

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

ROBERTO CARLOS PINTO

**IDENTIFICAÇÃO E MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS DE
MASSA ATRAVÉS DE AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO EM SISTEMA DE
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – ANÁLISE CONCEITUAL E UMA PROPOSTA
METODOLÓGICA**

CURITIBA

2015

ROBERTO CARLOS PINTO

**IDENTIFICAÇÃO E MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS DE
MASSA ATRAVÉS DE AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO EM SISTEMA DE
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – ANÁLISE CONCEITUAL E UMA PROPOSTA
METODOLÓGICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Everton Passos

Coorientadora: Profª. Drª. Sony Cortese Caneparo

CURITIBA

2015



MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR CIÊNCIAS DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA



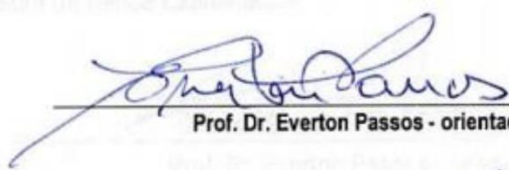
PARECER

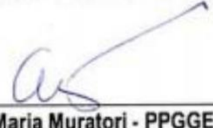
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Geografia reuniram-se para a arguição da Tese de Doutorado, apresentada pelo (a) candidato (a) **ROBERTO CARLOS PINTO** intitulada “IDENTIFICAÇÃO E MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS DE MASSA ATRAVÉS DE AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO EM SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – ANÁLISE CONCEITUAL E UMA PROPOSTA METODOLÓGICA”, para obtenção do grau de Doutora em Geografia, do Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná Área de Concentração **Espaço, Sociedade e Ambiente**, Linha de Pesquisa Paisagem e Análise.


Após haver analisado o referido trabalho e argüido o (a) candidato (a), são de parecer pela APROVAÇÃO da Tese.


Curitiba, 18 de maio de 2015.

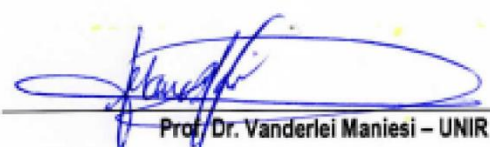
Nome e Assinatura da Banca Examinadora:


Prof. Dr. Everton Passos - orientador


Prof. Dr. Ana Maria Muratori - PPGGEO/UFPR


Prof. Dr. Hideo Araki - PPG Geodésias/UFPR


Prof. Dr. Leonardo José Cordeiro Santos - PPGGEO/UFPR


Prof. Dr. Vanderlei Maniesi – UNIR

AGRADECIMENTOS

Aos membros que compuseram a banca examinadora de defesa da tese de doutorado;

Ao Prof. Dr. Everton Passos pela dedicada orientação, confiança e amizade que foram
imprescindíveis para a realização deste trabalho;

À coorientadora Prof^a. Dr^a. Sony Cortese Caneparo pelo incentivo, acompanhamento,
atenção e apoio em todo o processo;

Ao Prof. Dr. Claudinei Taborda da Silveira pela contribuição dada à pesquisa, com suas
sugestões e disponibilização de materiais relacionados;

Ao Prof. Dr. Leonardo José Cordeiro dos Santos pelas sugestões e incentivo;

Ao Prof. Dr. Marcos Aurélio Tarlombani Silveira por suas palavras de estímulo;

À Prof^a. Dr^a. Olga Lúcia C. de Freitas Firkowski Coordenadora do Programa de Pós-
Graduação em Geografia da UFPR;

Aos demais professores do Programa;

À secretária Adriana Cristina Oliveira, sempre muito eficiente, atenciosa e gentil;

Ao grande amigo Luiz Carlos Zem, por todo apoio e incentivo nessa longa caminhada;

Ao amigo e Prof. Dr. Marciel Lohmann, pela participação na banca de qualificação e
suas valiosas sugestões que contribuíram muito para desenvolvimento da pesquisa;

Ao Prof. Dr. Donizete Antônio Giusti pelas importantes contribuições na banca de
qualificação;

À MINEROPAR Minérios do Paraná S/A, representada por Oscar Salazar Júnior, pela
disponibilização de materiais e total apoio à realização do trabalho;

Aos meus grandes amigos pessoais, Kleber Oliveira e Fabiane Telles que estão sempre
juntos, inclusive nas dificuldades encontradas nas atividades de campo;

Ao sempre parceiro Carlos Eduardo Sauer, pelas nossas estimulantes e produtivas
conversas.

À minha querida mãe Emília Ratti Pinto por toda atenção e apoio incondicional;

Em especial, a minha esposa, Jaqueline de Paula Borges Pinto, pelo amor, dedicação,
incentivo, ajuda e principalmente pela sua compreensão durante todo período dedicado
à realização desta tese.

RESUMO

Os movimentos de massa nas encostas são importantes processos naturais transformadores do relevo e têm suas ocorrências distribuídas no espaço conforme atuação dos condicionantes de instabilidade das vertentes. Quando desenvolvidos em áreas habitadas, processos de grande intensidade são responsáveis por verdadeiras catástrofes socioeconômicas e ambientais, justificando o crescente interesse da comunidade científica e da sociedade em geral pela temática. O presente estudo propõe o desenvolvimento de uma metodologia para identificação e mapeamento de áreas susceptíveis à ocorrência dos movimentos de massa, mais precisamente as áreas de origem dos eventos, como importante instrumento auxiliar a gestão e planejamento ambiental em áreas de risco. Tais movimentos bruscos de materiais diversos são recorrentes no Brasil, abordados na presente tese em cenário de suscetibilidade, especificamente quanto à delimitação de áreas em relevo montanhoso. A área de estudo é a Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí, situada na porção ocidental da Serra da Prata, compreendendo parte dos municípios de Morretes e Paranaguá no Estado do Paraná, afetada fortemente por processos correlatos ocorridos em março de 2011. A pesquisa desenvolveu uma modelagem preditiva em Sistema de Informações Geográficas por meio da Avaliação Multicritério, pelos métodos da Combinação Linear Ponderada e Média Ponderada Ordenada dos fatores condicionantes: declividade, altitude, forma das vertentes, distância dos rios, tipos de solo, litologia, uso da terra e cobertura vegetal que foram padronizados e posteriormente agregados e combinados. A cartografia do cenário de suscetibilidade resultante foi validada por retroanálise, sobrepondo-se ao registro obtido em imagens de cicatrizes do evento reportado, com coincidência de 80,13% em classes mapeadas como Alta e Muito Alta Suscetibilidade na Combinação Linear Ponderada e 82,56% para as mesmas categorias na Média Ponderada Ordenada, sendo que no último houve 64,82% de coincidência dos processos com a classe Muito Alta Suscetibilidade, demonstrando a considerável eficiência do modelo proposto. Além do produto cartográfico, o resultado comprovou que a adoção dos métodos descritos, a partir do seu arcabouço teórico metodológico, possibilita a integração dos fatores envolvidos de modo que análises complexas sejam avaliadas em sua totalidade, produzindo resultados concisos.

Palavras chave: Movimentos de massa. Vertentes. Suscetibilidade. Processos. Condicionantes.

ABSTRACT

Mass movements on the slopes are important natural processes of relief and transformers have their occurrences distributed in space according to performance of conditioning of instability of the slopes. When developed in populated areas, intensive processes are responsible for true socioeconomic and environmental disasters, justifying the growing interest of the scientific community and society in general by theme. This study proposes the development of a methodology for identification and mapping of the likely occurrence of mass movements, areas more precisely the areas of origin of the events as an important instrument to assist management and environmental planning in risky areas. Such sudden movements of various materials are recurrent in Brazil, addressed in this thesis in susceptibility scenario, specifically concerning the delimitation of areas in mountainous terrain. The study area is the Jacarei River Basin, located in the western portion of the Serra da Prata, comprising the municipalities of Morretes and Paranaguá in Paraná State, correlates strongly affected by processes occurring in March 2011. The research develops a predictive modeling in Geographic Information Systems through Multicriteria Evaluation, by the methods of Weighted Linear Combination and Ordered Weighted Average of conditioning of conditioning factors: slope, altitude, so the slopes, distance to rivers, soil types, lithology, land use and vegetation cover which were standardized and then aggregated and combined. The resulting mapping of susceptibility scenario was validated by back analysis, overlapping the register obtained images of scars in the event reported, with coincidence of 80.13% in classes mapped as High and Very High Susceptibility and the Weighted Linear Combination 82.56% for the same categories in the Ordered Weighted Average, and the last was 64.82% match with the class of processes Very High Susceptibility, demonstrating the considerable efficiency of the proposed model. Besides the cartographic product, the result proved that the adoption of methods, from its theoretical and methodological framework, enables the integration of factors involved so that complex analyzes be evaluated in its entirety, producing concise results.

Key words: Mass movements. Slopes. Susceptibility. Processes. Conditioning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Perfil esquemático do processo de rastejo (<i>creep</i>).....	26
FIGURA 2 - Perfil esquemático do processo de corridas de massa (<i>debris flow</i>)	29
FIGURA 3 - Perfil esquemático do processo de escorregamento. (A) escorregamento planar ou translacional e (B) escorregamento circular ou rotacional.....	32
FIGURA 4 - Perfil esquemático do processo de queda de blocos.....	34
FIGURA 5 - (A) Perfil esquemático do processo de tombamento de blocos rochosos. (B) Perfil esquemático do processo de rolamento de blocos rochosos.....	35
FIGURA 6 - Foto ilustrando movimentos de massa ocorridos na Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011, município de Teresópolis.	55
FIGURA 7 - Fluxograma com classificação dos Riscos Ambientais.....	58
FIGURA 8 - O sistema em uma vertente convexo-retilínea-côncava.	62
FIGURA 9 - Designação dos vários segmentos da vertente.	63
FIGURA 10 - Combinações de curvaturas verticais e horizontais para caracterização das vertentes.....	64
FIGURA 11 - Diferença entre a Fronteira <i>Fuzzy</i> (A) e <i>Booleana</i> (B).....	78
FIGURA 12 - Tipos de curvas de pertinência.	80
FIGURA 13 - Foto com visão panorâmica da Serra da Prata, na Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí. Estrada rural que dá acesso à Comunidade Floresta	85
FIGURA 14 - Cartograma com a localização da Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí, divisa entre os municípios de Morretes e Paranaguá – PR.....	86
FIGURA 15 - Precipitação média anual e sazonal do litoral paranaense.....	90
FIGURA 16 - Precipitação média anual da Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí e imediações..	91
FIGURA 17 - Direção predominante dos ventos no Estado do Paraná, frequência média anual. Destaque para região onde se localiza a área de estudo.....	92
FIGURA 18 - Imagem demonstrando material arenoso e com seixos menores retrabalhados pela ação fluvial, aproximadamente um ano após a corrida de lama de março de 2011, na margem esquerda do Rio Jacareí	95

FIGURA 19 - Areia, seixos e outros materiais detríticos incluindo mistura de solos, árvores, lixo e resto de edificações destruídas, transportados e depositados pela corrida de lama de março de 2011, na margem esquerda do Rio Jacareí.....	96
FIGURA 20 - Fotografia ilustrando exposição de depósitos coluvionares, recobrimdo matacões na margem direita do rio Tingidor, com elevado grau de intemperismo	97
FIGURA 21 – Cartograma com a litologia da Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí.	99
FIGURA 22 – Cartograma com a geomorfologia da Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí.	103
FIGURA 23 – Cartograma com a rede de drenagem da Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí	106
FIGURA 24 – Cartograma com os tipos de solo da Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí.	108
FIGURA 25 - Imagem orbital com limites do Parque Nacional Sant Hilaire/Lange (polígono em vermelho), Serra da Prata e áreas contíguas, dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí.	112
FIGURA 26 - Pequena propriedade agrícola com cultivo de hortaliças na margem esquerda do Rio Jacareí.	114
FIGURA 27 – Cartograma de uso da terra e cobertura vegetal da Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí	115
FIGURA 28 - Fluxograma com a síntese das etapas da pesquisa.....	120
FIGURA 29 - Detalhe do segmento do vale do Rio Tingidor, afluente do Rio Jacareí, percorrido na linha de talvegue. Recorte da carta topográfica Alexandra, Folha SG.22-X-D-V/2-NO, escala 1:25.000.....	129
FIGURA 30 – Cartograma com os PI's utilizados como base de entrada para desenvolvimento da pesquisa. Na ordem: Modelo Numérico do Terreno; Declividade; Hipsometria; Tipos de solo; Forma das Vertentes; Litologia; Drenagem; Uso da Terra e Cobertura Vegetal..	132
FIGURA 31 - Sigmoidal Crescente – Declividade..	136
FIGURA 32 - Sigmoidal Crescente – Altitude.....	137
FIGURA 33 - Sigmoidal Decrescente – Distância dos rios.....	138
FIGURA 34 - Sigmoidal Decrescente – Forma das vertentes.	138

FIGURA 35 - Linear Crescente – Tipos de Solo.....	140
FIGURA 36 - Linear Crescente – Litologia.	141
FIGURA 37 - Linear Crescente – Uso e ocupação da terra e cobertura vegetal.....	143
FIGURA 38 - Módulo de Avaliação Multicritério – MCE. Método: Combinação Linear Ponderada – WCL.....	148
FIGURA 39 - Espaço de estratégia para tomada de decisão.....	149
FIGURA 40 - Módulo de Avaliação Multicritério – MCE. Método: Média Ponderada Ordenada - OWA. FONTE: <i>Software IDRISI TAIGA</i>	152
FIGURA 41 - Delimitação das cicatrizes com zonas de origem dos movimentos de massa.....	154
FIGURA 42 - Cartograma com os PI's da Padronização Fuzzy: A – Declividade; B – Altitude; C – Forma das vertentes; D – Distância dos Rios; E – Tipos de Solo; F – Litologia; G - Uso da Terra e Cobertura Vegetal.	158
FIGURA 43 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré pelo método da Combinação Linear Ponderada.	160
FIGURA 44 - Mapa com diferentes classes de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré pelo método da Combinação Linear Ponderada.	161
FIGURA 45 - Espaço de estratégia para tomada de decisão indicando a posição dos cenários gerados.....	164
FIGURA 46 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré pela Média Ponderada Ordenada – OWA, com risco mínimo (AND) e sem compensação entre os fatores (Cenário 1).	166
FIGURA 47 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré pela Média Ponderada Ordenada – OWA, com risco máximo (OR) e sem compensação entre os fatores (Cenário 2).	167
FIGURA 48 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré pela Média Ponderada Ordenada – OWA, com risco médio/baixo e compensação parcial entre os fatores (Cenário 4).....	169

FIGURA 49 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí pela Média Ponderada Ordenada – OWA, com risco médio/alto e compensação parcial entre os fatores (Cenário 5).....	171
FIGURA 50 - Mapa com diferentes classes de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí pelo método da Média Ponderada Ordenada-OWA, com risco médio/alto.	172
FIGURA 51 - Gráfico cumulativo com análise de desempenho do cenário de suscetibilidade sobreposta às áreas movimentadas.	173
FIGURA 52 – Classes de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí pela Média Ponderada Ordenada com mapa de inventário das cicatrizes sobreposto.....	174
FIGURA 53 - Foto obtida imediatamente após o evento demonstrando a existência de remanescentes de áreas florestadas onde não houve escorregamento ou desprendimento de blocos, inseridas no mesmo contexto de suscetibilidade das áreas adjacentes.....	175
FIGURA 54 - Mapa com pontos de visita em campo para tomadas fotográficas indicando diferentes classes de suscetibilidade	178
FIGURA 55 - Ponto 1, foto ilustrando área classificada como Sem Suscetibilidade ao desencadeamento de movimentos de massa em questão (declividade inferior a 6%). Observa-se a grande quantidade de troncos depositados, resultante dos eventos de março de 2011, configurando-se, portanto, como área diretamente afetada pela deposição dos materiais movimentados das encostas.	179
FIGURA 56 - Ponto 2, a foto ilustra área livre de ocorrência dos movimentos de massa na forma de desprendimentos. Planície de inundação, área de deposição, com cultivo de hortaliças, também classificada como Sem Suscetibilidade.....	179
FIGURA 57 - Ponto 3, foto ilustrando área com Baixa Suscetibilidade. Observa-se a ocupação residencial, declividade em torno de 10%, com vegetação rasteira à frente e em estágio inicial ao fundo.....	180
FIGURA 58 - Ponto 4, Baixa Suscetibilidade. Estrada rural com 6 a 12% de declividade, solo espesso e vegetação em estágio intermediário.....	181

FIGURA 59 - Ponto 5, Moderada Suscetibilidade. Área de ocupação rural com declividades entre 12 e 20%. Pequena propriedade agrícola ocupada com pastagem	182
FIGURA 60 - Ponto 6, às margens do vale do Rio Tingidor, afluente do Rio Jacareí. Área classificada como de Moderada Suscetibilidade. Os blocos rochosos de litologia diversificada, com certo grau de intemperismo, em patamares ou ombreiras onde a natureza dos materiais demonstram que a área sofreu deposição no passado em ações de eventos similares ocorridos no mesmo vale.....	182
FIGURA 61 - Ponto 7, classificada como de Alta Suscetibilidade, a área é caracterizada por declividades acima de 35%, proximidade do canal fluvial inferior a 20m e com outras características como às observáveis no solo e materiais deposicionais expostos sobre rocha sã a qual constitui uma superfície de baixíssima permeabilidade em plano de ângulo favorável ao escorregamento.	183
FIGURA 62 - Ponto 8, Alta Suscetibilidade. Ao fundo, morros isolados com pastagem (lado direito) e vegetação em estágio avançado de desenvolvimento (lado esquerdo). Em primeiro plano, materiais depositados em cone de dejeção, produzido no evento de março de 2011 em processo de retrabalhamento pela ação fluvial.	184
FIGURA 63 - Ponto 9: Muito Alta Suscetibilidade. Área isolada, recoberta por vegetação em estágio avançado de desenvolvimento, porém caracterizada por declividade elevada, acima de 40% e perfil côncavo, com cicatrizes visíveis de escorregamentos do episódio de março de 2011.	185
FIGURA 64 - Ponto 10, Muito Alta Suscetibilidade. Ao fundo, no alto da encosta observam-se cicatrizes dos movimentos e a área contígua, que está no mesmo contexto de suscetibilidade. Fotografia tomada a partir do talvegue do Rio Tingidor, afluente do Rio Jacareí, com visão para montante..	186

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CLASSES DE DECLIVIDADE ASSOCIADAS A DIFERENTES TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA.	43
TABELA 2 - CONDICIONANTES FÍSICOS E ANTRÓPICOS UTILIZADOS PARA ESTIMAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE E RISCO A MOVIMENTOS DE MASSA.....	123
TABELA 3 - CONDICIONANTES SUBMETIDOS AO PROCESSAMENTO EM SIG E OS RESPECTIVOS PARÂMETROS QUE INDICARAM ÁREAS SUSCETÍVEIS E DE RISCO A MOVIMENTOS DE MASSA.	127
TABELA 4 - VALORES ATRIBUÍDOS DE ACORDO COM A SUSCETIBILIDADE DOS SOLOS À EROSÃO E MOVIMENTOS DE MASSA.	139
TABELA 5 - VALORAÇÃO DO GRAU DE RESISTÊNCIA DAS ROCHAS PARA INTEMPERISMO E EROSÃO.	141
TABELA 6 - VALORES ATRIBUIDOS À SUSCETIBILIDADE DE ACORDO COM USO DA TERRA E COBERTURA VEGETAL.	142
TABELA 7 - DETERMINAÇÃO DOS PESOS DE IMPORTÂNCIA RELATIVA PARA SUSCETIBILIDADE	147
TABELA 8 - RISCO ASSUMIDO PARA A TOMADA DE DECISÃO.....	152
TABELA 9 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE DA ÁREA DE ESTUDO. CENÁRIO DA COMBINAÇÃO LINEAR PONDERADA.	162
TABELA 10 – PESOS DE ORDENAÇÃO PARA OS FATORES UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO, PELO MÉTODO DA MÉDIA PONDERADA ORDENADA (OWA). C1 = CENÁRIO 1 (AND), RISCO MÍNIMO, NENHUMA COMPENSAÇÃO; C2 = CENÁRIO 2 (OR), RISCO MÁXIMO, NENHUMA COMPENSAÇÃO; C3 = CENÁRIO 3 (WLC), RISCO MÉDIO, COMPENSAÇÃO TOTAL; C4 = CENÁRIO 4, RISCO MÉDIO/BAIXO, COMPENSAÇÃO PARCIAL; C5 = CENÁRIO 5, RISCO MÉDIO/ALTO, COMPENSAÇÃO PARCIAL.	164
TABELA 11 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE DA ÁREA DE ESTUDO. CENÁRIO 5 MÉDIA PONDERADA ORDENADA.	173

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - ESCALA COM CLASSIFICAÇÃO DECRESCENTE DE RESISTÊNCIA A DENUDAÇÃO DOS TRÊS TIPOS DE ROCHAS.	39
QUADRO 2 - ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS PARA ESTUDO DE PRECIPITAÇÃO DO LITORAL E DA BACIA HIDROGRAFICA DO RIO JACAREÍ.	89
QUADRO 3 - LISTA DE AUTORES UTILIZADOS PARA ELABORAÇÃO DA TABELA DE CONDICIONANTES DOS MOVIMENTOS DE MASSA.	124
QUADRO 4 - ESCALA DE VALORES AHP PARA COMPARAÇÃO PAREADA.....	144
QUADRO 5 - ESCALA DE COMPARAÇÃO DE CRITÉRIOS.	145
QUADRO 6 - PESOS FINAIS DE IMPORTÂNCIA RELATIVA.....	147
QUADRO 7 – PONTOS DE CONTROLE DE CAMPO COM SUAS RESPECTIVAS COORDENADAS UTM.	177

LISTA DE SIGLAS

AHP	Processo Analítico Hierárquico (<i>Analytical Hierarchy Process</i>)
APA	Área de Proteção ambiental
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DSG	Diretoria do Serviço Geográfico do Exército
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GPS	Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System</i>)
IAPAR	Instituto Agrônômico do Paraná
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de pesquisas Espaciais
IPARDES	Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas – São Paulo
MCE	Avaliação por Múltiplos Critérios (<i>Multi Criteria Evaluation</i>)
MNT	Modelo Numérico do Terreno
MINEROPAR	Minérios do Paraná S/A.
OWA	Média Ponderada Ordenada (<i>Ordered Weighted Average</i>)
PI	Plano de Informação
PNSHL	Parque Nacional Saint Hilaire/Lange
SAD-69	South American Datum 1969
SEMA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente
SIG's	Sistemas de Informações Geográficas
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
SIRGAS	Sistema de Referencial Geodésico da América do Sul
TC	Taxa de Consistência
WCL	Combinação Linear Ponderada (<i>Weighted Linear Combination</i>)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
2.1 MOVIMENTOS DE MASSA	23
2.1.1 Tipos de movimentos de massa.....	24
2.1.1.1 Rastejamento ou <i>creep</i>	26
2.1.1.2 Solifluxão.....	27
2.1.1.3 Corridas de Massa (<i>debris flow</i>).....	28
2.1.1.4 Escorregamentos	31
2.1.1.5 Desmoronamentos	33
2.1.1.6 Queda de Blocos.....	33
2.2 PRINCIPAIS CONDICIONANTES E DESENCADEANTES DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA	36
2.2.1 Geologia	37
2.2.2 Pedologia	39
2.2.3 Geomorfologia.....	41
2.2.3.1 Declividade.....	41
2.2.3.2 Altitude	43
2.2.3.3 Forma das Vertentes.....	44
2.2.3.4 Orientação das Vertentes.....	46
2.2.4 Vegetação	46
2.2.5 Ação antrópica	48
2.2.6 Fator Desencadeante: Pluviosidade.....	49
2.3 BREVE HISTÓRICO DOS MOVIMENTOS DE MASSA NO BRASIL.....	52
2.4 TERMINOLOGIA ASSOCIADA A ANÁLISES QUE ENVOLVEM MOVIMENTOS DE MASSA ENQUANTO DESASTRES NATURAIS.....	55
2.5 BACIA HIDROGRÁFICA COMO SISTEMA	59
2.5.1 Subsistema vertente.....	61
2.5.1.1 Subsistema canal fluvial.....	67

2.6 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG's) APLICADOS AOS ESTUDOS DE MOVIMENTOS DE MASSA	71
2.6.1 Avaliação Multicritério e padronização dos condicionantes.....	74
2.6.1.1 Combinação Linear Ponderada (<i>Weighted Linear Combination – WLC</i>).....	82
2.6.1.2 Média Ponderada Ordenada (<i>Ordered Weighted Average – OWA</i>).....	83
3. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	85
3.1 CLIMA	87
3.2 GEOLOGIA	93
3.3 GEOMORFOLOGIA	100
3.4 DRENAGEM.....	103
3.5 SOLOS	106
3.6 VEGETAÇÃO E USO DA TERRA.....	109
4. MATERIAL E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	116
4.1 MATERIAL	116
4.1.1 Referencial Específico.....	116
4.1.2 Base de dados cartográficos	117
4.1.3 <i>Softwares</i> e equipamentos	118
4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	118
4.2.1 Seleção da área de estudo.....	121
4.2.2 Determinação dos condicionantes	122
4.2.3 Levantamento de campo	128
4.2.4 Utilização dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's).	129
4.2.4.1 Geração e adaptação dos Planos de Informação (PI's)	130
4.2.5 Avaliação Multicritério.....	133
4.2.5.1 Padronização dos critérios	133
4.2.5.1.1 Restrição: declividade inferior a 6%.....	134
4.2.5.1.2 Fator: declividade.....	135
4.2.5.1.3 Fator: altitude.....	136
4.2.5.1.4 Fator: distância dos rios.....	137
4.2.5.1.5 Fator: forma das vertentes.....	138
4.2.5.1.6 Fator: tipos de solo.....	139

4.2.5.1.7 Fator: litologia.....	140
4.2.5.1.8 Fator: uso, ocupação da terra e cobertura vegetal.....	142
4.2.5.2 Ponderação das variáveis	143
4.2.5.3 Método da Combinação Linear Ponderada (<i>Weighted Linear Combination – WCL</i>).....	147
4.2.5.4 Método da Média Ponderada Ordenada (<i>Ordered Weighted Average - OWA</i>)	149
4.2.6 Desvio Quartílico	152
4.2.7 Validação dos resultados	153
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	155
5.1 MAPAS PADRONIZADOS	155
5.2 CENÁRIO DE SUSCETIBILIDADE GERADO PELA COMBINAÇÃO LINEAR PONDERADA (<i>WEIGHTED LINEAR COMBINATION – WLC</i>).....	159
5.3 CENÁRIOS DE SUSCETIBILIDADE GERADOS PELA MÉDIA PONDERADA ORDENADA (<i>ORDERED WEIGHTED AVERAGE – OWA</i>).....	163
5.4 AVALIAÇÃO DE CAMPO	176
6 CONCLUSÕES	187
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	191
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	193
ANEXOS	210

1 INTRODUÇÃO

Reconhecidos como processos naturais e contínuos de evolução das vertentes, decorrentes da ação de agentes geológicos e outros, os movimentos de massa¹, em muitos casos, são induzidos e/ou tem sua funcionalidade potencializada pela ação antrópica, tendo em vista que o homem é um importante agente modificador da dinâmica das encostas, consequência de diversas formas de uso e ocupação da terra.

Quando ocorrem em áreas urbanas, eventos de grande magnitude relacionados aos referidos movimentos, causam impactos negativos à sociedade, com prejuízos de ordem econômica e social. Em áreas rurais, as perdas de massa de material inconsolidado das vertentes, relacionadas às atividades agrícolas e pecuárias desenvolvidas de modo inadequado, são geralmente consideráveis e estão associadas a processos erosivos resultante da erosão hídrica que em larga escala, ao longo do tempo e em estágios avançados é acelerada nos locais de fluxos concentrados e de ravinamento, onde o movimento de massa (desmoronamento das laterais dos sulcos) resulta em perda de grandes volumes de solos e do manto de intemperismo, tornando grandes áreas improdutivas, com consequentes implicações de alterações ambientais globais.

Desse modo, estudos relativos ao reconhecimento das causas e consequências dos movimentos de massa são relevantes à sociedade e mais precisamente aqueles voltados à geração de cenários preditivos de suscetibilidade e/ou risco, como o caso desta pesquisa, na perspectiva de contribuir para a gestão e planejamento do uso e ocupação da terra, proporcionando mais segurança para a população em geral.

Os diferentes tipos de movimentos de massa sob ação gravitacional, com materiais constituintes das vertentes, consolidados ou não, caracterizam-se como importantes processos erosivos responsáveis pela evolução das encostas e interflúvios, com consequente assoreamento e deposição em fundo de vales ou planícies, afetando

¹ Os movimentos de massa são responsáveis pela mobilização e transporte coletivo de material constituído de solo e/ou rocha pela encosta abaixo, onde a ação gravitacional tem papel preponderante e a água de chuvas atua como principal agente deflagrador dos processos. Resultam de uma ruptura provocada pela alteração do equilíbrio entre as forças de resistência e as forças tangenciais e tem sua origem associada aos fatores de predisposição ou condicionantes e também aos fatores desencadeantes (ZÉZERE, 2005).

o relevo como um todo. “De forma geral, em função da geometria do relevo, do tipo de material envolvido e também da velocidade de deslocamento, são classificados em: rastejos, escorregamentos, quedas de blocos e corridas de massa ou lama.” (MINEROPAR S/A 2010).

As diversas terminologias utilizadas para definição dos tipos de movimentos de massa constituem em dificuldades para o melhor entendimento destes fenômenos. Comumente, os meios de comunicação divulgam informações incompletas e até mesmo errôneas referentes às diversas categorias existentes. Deste modo, o conhecimento referente à tipologia dos movimentos transcende a importância no contexto de estudos que buscam identificar a relação entre os condicionantes de instabilidade das vertentes e a distribuição dos eventos, auxiliando na compreensão do processo evolutivo da paisagem e no planejamento de seu uso e ocupação.

É consenso que em áreas com predomínio de relevo acidentado de serras ou montanhas, com fortes declives é maior a predisposição à ocorrência de movimentos de massa, principalmente os rápidos em forma de escorregamentos e corridas de lama e/ou detritos, sobretudo em regiões tropicais e subtropicais, onde os índices pluviométricos elevados propiciam grandes variações nas condições hidrodinâmicas do ambiente.

Em todo o globo terrestre, os movimentos de massa são desencadeados por uma série de agentes distintos como a precipitação intensa e/ou acumulada, os abalos sísmicos, as erupções vulcânicas, a fusão de neve e gelo e a ação humana (ZÊZERE, 2005).

A presente pesquisa menciona o caso específico do Brasil, onde as condições em que os processos são originados estão associadas à elevada pluviosidade, decorrente das características climáticas predominantes.

No Brasil, os movimentos de massa de grande magnitude, quando ocorridos em áreas ocupadas, ganham contexto de desastres naturais, uma vez que provocam consideráveis prejuízos socioeconômicos, inclusive com significativo número de vítimas fatais. Os estudos destes fenômenos no país intensificaram-se a partir de meados do século XX, em decorrência dos eventos considerados os mais catastróficos que se tem registro, entre estes estão os que aconteceram nas cidades de: Santos-SP, em 1956;

Caraguatatuba-SP, em 1967; Rio de Janeiro-RJ, nos anos de 1966 e 1967 e Tubarão-SC, no ano de 1974. (BIGARELLA *et al.*, 2003).

Mais recentemente, os ocorridos no Vale do Itajaí, Estado de Santa Catarina, em 2008; na região serrana do Rio de Janeiro, em 2011 e no litoral paranaense, também em 2011, podem ser considerados como processos de elevadas amplitudes e grandes proporções.

Reconhecendo que a distribuição dos movimentos de massa nas encostas depende de uma série de agentes ou fatores condicionantes de instabilidade, doravante tratados como **condicionantes** (geológicos, geomorfológicos, pedológicos, fitogeográficos e antrópicos), o processamento dos dados, referente às condições físicas e de uso e ocupação da terra, foi efetuado, servindo-se dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), que permitiu a coleta, armazenamento e tratamento dos dados primários, transformando-os em informações, posteriormente analisadas e apresentadas em formato digital por meio de cenários probabilísticos de suscetibilidade aos processos tratados.

Nesse contexto, o estudo partiu da **hipótese** que o somatório de condicionantes de instabilidade das vertentes determina a distribuição dos movimentos de massa e, por conseguinte, que a definição dos parâmetros e agregação destes atributos relacionados, sob a perspectiva multicriterial em ambiente SIG, permite gerar cenários de suscetibilidade consistentes.

Para a geração do mapeamento de suscetibilidade aos movimentos de massa com emprego da Avaliação Multicritério, a pesquisa combinou a abordagem heurística, baseada no conhecimento empírico, com a abordagem estatística, que se apoia na relação entre os parâmetros de instabilidade dos condicionantes envolvidos em processos antigos.

A pesquisa adotou parâmetros testados, atribuídos com base no conhecimento especializado aos diversos fatores condicionantes em análise e não estabeleceu relação direta com episódios pretéritos, entretanto, utilizou o mapa de inventário com as cicatrizes dos eventos ocorridos em março de 2011 na área em questão para validação dos resultados.

A opção de utilizar informações secundárias, com parâmetros de fragilidade ambiental e de instabilidade das encostas adotados e testados em estudos correlatos, possibilitou a substituição do mapa de inventário como condição indispensável para produção do modelo, sem prejuízos em termos de consistência dos resultados e com a vantagem de possibilitar a aplicação deste modelo em outros estudos de caso, com condições naturais e socioeconômicas semelhantes ou não.

O método empregado, Avaliação Multicritério (*Multi Criteria Evaluation - MCE*), combina e agrega os diversos fatores condicionantes envolvidos.

A sistematização e sequência das etapas da tese foram organizadas a partir da proposta metodológica de Libault (1971) que subdivide a pesquisa em quatro níveis: compilatório, correlatório, semântico e normativo.

Neste contexto, o objetivo geral foi propor uma metodologia de mapeamento preditivo de suscetibilidade a movimentos de massa, identificando zonas de origem dos processos, utilizando-se de Avaliação Multicritério, incorporada ao Sistema de Informações Geográficas (SIG). Para tanto, foram estabelecidos alguns objetivos específicos, quais sejam:

- ✓ Compreender a natureza do terreno estudado, referindo-se aos aspectos físicos (geologia, geomorfologia, pedologia, cobertura vegetal) e antrópicos (uso da terra);
- ✓ Identificar os tipos de movimentos de massa ocorridos na área em análise na ocasião do evento estudado;
- ✓ Definir os principais condicionantes de instabilidade das vertentes por meio de levantamento bibliográfico;
- ✓ Selecionar e correlacionar os fatores condicionantes dos movimentos de massa a partir da Avaliação Multicritério;
- ✓ Definir parâmetros de suscetibilidade para as variáveis adotadas conforme referencial específico;
- ✓ Construir diferentes cenários de suscetibilidade utilizando-se dos métodos: Combinação Linear Ponderada e Média Ponderada Ordenada;
- ✓ Comparar os cenários de suscetibilidade produzidos com intuito de demonstrar as tendências teóricas de métodos disponíveis no aplicativo SIG e identificar o produto com maior índice de acerto;

✓ Verificar a consistência dos resultados a partir da comparação com o mapa de inventário das cicatrizes dos movimentos de massa ocorridos em março de 2011 e através da identificação de pontos de controle fotográficos em campo.

O mapeamento de suscetibilidade é considerado uma etapa fundamental para a gestão de riscos naturais². Nessa perspectiva, a presente pesquisa contribui diretamente com órgãos gestores, responsáveis pela implementação de políticas públicas de planejamento ambiental, que visam empregar medidas preventivas e mitigadoras aos impactos negativos causados por desastres associados.

As discussões e os resultados obtidos podem ser apropriados pelos sistemas de defesa civil que, por sua vez, podem utilizá-los para aprofundar o conhecimento envolvendo os movimentos de massa como agentes operantes na dinâmica de formação e evolução da paisagem; dos condicionantes envolvidos e dos impactos resultantes destes processos, na perspectiva de minimizar os seus efeitos nocivos, refletindo diretamente em segurança ambiental e, conseqüentemente, em qualidade de vida.

A área de estudo foi definida a partir de observações em campo, que possibilitou o reconhecimento da grandeza dos eventos ocorridos no mês de março de 2011 no litoral do Estado do Paraná, mais precisamente na Serra da Prata, compartimento pertencente ao complexo da Serra do Mar, coberta pela Floresta Ombrófila Densa (Mata Atlântica).

A pesquisa se desenvolveu especificamente na Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré, Baía de Paranaguá, situada na divisa dos municípios de Morretes e Paranaguá, inserida numa área caracterizada pela fragilidade ambiental, cercada por morros, Mata Atlântica, mangues, restingas e um grande número de nascentes. Parte da bacia está dentro do Parque Nacional Saint Hilaire/Lange, criado justamente para proteger os ambientes descritos e tem suas nascentes da margem direita na Serra da Prata.

Na ocasião da ocorrência dos eventos de março de 2011, a elevada pluviosidade em conjunto com outras características ambientais da região,

² ROCHA (2005, p. 26) divide os riscos ambientais em riscos naturais, riscos tecnológicos e riscos sociais.

desencadeou intensos movimentos de massa, que resultaram em transformações importantes na paisagem.

Observou-se *in loco*, alteração na cobertura vegetal, sendo que parte da vegetação foi retirada e deslocada vertente abaixo; mudança na profundidade e vazão dos corpos d'água, uma vez que houve assoreamento de muitos leitos, com consequente desvio do canal fluvial e, também, alteração na composição dos sedimentos na planície de inundação, tendo em vista que o material deslocado recobriu antigos depósitos. O evento contribuiu também para o assoreamento da Baía de Paranaguá, devido o grande volume de sedimentos transportado.

Do ponto de vista socioeconômico, casas, ruas, pontes e outras instalações foram destruídas, muitos cidadãos foram prejudicados com a perda de suas residências, áreas de cultivo e de criação de animais.

A tese está organizada em oito capítulos, incluindo a introdução que trata da problemática, hipótese, justificativa e aos objetivos.

O segundo capítulo apresenta o referencial teórico, que realça a fundamentação teórica e metodológica adotada, no qual são efetuadas considerações e abordados conceitos de diferentes autores especialistas na temática. Nesse item, foram discutidos os temas referentes aos tipos de movimentos de massa e seus principais condicionantes; histórico dos movimentos de massa no Brasil; terminologias associadas aos movimentos de massa enquanto desastres naturais; a bacia hidrográfica como sistema; o subsistema vertente e, finalmente, o uso do Sistema de Informações Geográficas (SIG) em conjunto com Avaliação Multicritério para análise e modelagem.

O terceiro capítulo refere-se à localização e caracterização da área de pesquisa, apresenta de forma detalhada, as características físicas da região, faz menção aos aspectos socioeconômicos correlacionados e descreve ainda, alguns aspectos momentâneos diretamente associados ao evento específico de março de 2011.

O quarto capítulo descreve o material (base cartográfica e equipamentos) e os procedimentos metodológicos desenvolvidos e utilizados: A proposta metodológica de Libault (1971), a Avaliação Multicritério (Combinação Linear Ponderada e Média Ponderada Ordenada), os critérios adotados, as atividades de campo e de laboratório.

Compõe essa etapa o procedimento aplicado para a validação dos resultados. O quinto capítulo refere-se aos resultados obtidos e as discussões inerentes a estes, apresentando o produto final do trabalho, após a combinação e integração dos dados.

No sexto e sétimo capítulos, são apresentadas as conclusões e considerações finais, respectivamente. Portanto, são efetuadas reflexões e avaliações acerca de todo o processo para execução do trabalho, dos resultados obtidos e suas relações com a hipótese e objetivos propostos. Também são discutidas nesses itens, as recomendações e contribuições pertinentes para estudos futuros. Por fim, no oitavo capítulo são listadas as referências bibliográficas utilizadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo, subdividido em cinco partes, apresenta o referencial teórico bibliográfico empregado no desenvolvimento da pesquisa, com objetivo principal de contextualizar a temática abordada, fornecendo subsídios científicos que contribuem diretamente para o entendimento do tema proposto. Inicialmente a abordagem refere-se à conceituação dos movimentos de massa e segue descrevendo características de cada tipologia específica. Posteriormente, as reflexões são relativas aos condicionantes envolvidos nos processos atuantes na estabilidade/instabilidade das vertentes. Em seguida, é discutida a terminologia associada aos processos de movimentos de massa enquanto desastres naturais, passando pela análise da bacia hidrográfica como unidade de área de estudo. Finalmente, as considerações referem-se ao uso dos Sistemas de Informações Geográficas e Avaliação Multicritério, apoiados em técnicas estatísticas de padronização e ponderação como apoio à tomada de decisão.

2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Pesquisas relacionadas aos movimentos de massa como agente exógeno atuante na formação e desenvolvimento do relevo, dos fatores condicionantes e desencadeantes, das consequências destes processos à sociedade, são objetos de interesse de inúmeros pesquisadores, que desenvolveram estudos relacionados a essa temática, citam-se, entre outros: (BIGARELLA; AB'SABER, 1964; BIGARELLA; MOUSINHO; SILVA, 1965; BIGARELLA *et al.*, 2003; DYLIK, 1968; PENTEADO, 1974; CHRISTOFOLETTI, 1980; NIEBLE; GUIDICINE, 1984; IPT, 1991; CASSETI, 1994, 2005; FERNANDES; AMARAL, 2000; ZÊZERE, 2005; GUERRA; MARÇAL, 2006; ZAIDAN, 2006; MINEROPAR, 2010, 2011).

Considerando o processo evolutivo, contínuo e lento das vertentes, Bigarella *et al.* (2003 p. 984) reportam-se aos pressupostos de Davis³, observando que “o manto de intemperismo migraria pela ação da gravidade vertente abaixo, sendo então removido

³ Davis, W. M. - 1932 – Base Range Types. Science. 76:241-245.

pelo rio como parte de sua carga. O recuo das encostas seria seguido por uma diminuição de sua declividade”.

Guerra e Marçal (2006, p. 75 - 76) caracterizam os movimentos de massa como sendo “o transporte coletivo de material rochoso e/ou de solo, onde a ação da gravidade tem papel preponderante, podendo ser potencializado, ou não, pela ação da água.”

Segundo Suguio (2003, p. 347) tais processos são “movimentos coletivos de blocos de rochas e de materiais terrosos ligados a regolitos. O transporte desses materiais é propiciado pelo efeito da gravidade, somado à maior ou menor participação da água que atua como lubrificante”.

2.1.1 Tipos de movimentos de massa

A nomenclatura utilizada para a definição dos movimentos de massa em suas diversas tipologias: rastejamento, solifluxão, corridas de massa, corridas de lama, corridas de detritos, escorregamentos, desmoronamentos, queda de blocos, tombamentos, rolamentos, etc., está associada ao tipo de mecanismo, à velocidade de deslocamento e ao material envolvido. (VARNES, 1978).

Embora existam inúmeros estudos relacionados aos processos de movimentos de massa, algumas dúvidas referentes às terminologias e classificações persistem. A grande maioria dos autores trata de forma distinta, por exemplo, à erosão por escoamento superficial dos solos e os movimentos de massa e, invariavelmente, consideram “a velocidade de deslocamento de materiais vertente abaixo, o tipo de material envolvido, a geometria do terreno e a presença ou não de água para sua classificação.” (BIGARELLA; MOUSINHO 1965; BIGARELLA *et al.*, 2003; CHRISTOFOLETTI 1980; FERNANDES; AMARAL 2000; GUIDICINI; NIEBLE 1984; GARSON; KIRKBY⁴ 1972 *apud* CASSETI 2005; GUERRA; MARÇAL 2006; MINEROPAR 2010; IPT 1991; SUGUIO 2003).

Mesmo constatando tratamento diferenciado entre os fenômenos: movimentos de massa e erosão superficial do solo na forma de *splash*, laminar ou linear, é

⁴ CARSON, H.A. & KIRKBY, M.J. **Hillslope form and process**. Cambridge, Univ. Press, 1972.

importante ressaltar que nesta última categoria de erosão, os sulcos podem evoluir por influência das águas superficiais e subsuperficiais, incluindo lençol freático, até atingir grandes áreas, configurando-se em processo conhecido como voçoroca.

Nessa condição, com o desenvolvimento de *piping* (erosão interna ou tabular) em que dutos ou túneis provocam a remoção de partículas, por dissolução e carregamento de minerais em subsuperfície, removendo o material gradativamente, ampliam-se os diâmetros desses dutos, podendo resultar em colapsos do solo, com desabamentos que alargam lateralmente as voçorocas ou criam novos ramos. Assim, a evolução das voçorocas se faz mediante o desenvolvimento de processos combinados de erosão superficial, erosão interna, solapamentos, desabamentos e escorregamentos, que se conjugam para dotar essa forma de erosão de elevado poder destrutivo. (GUERRA; CUNHA, 1998; MINEROPAR S/A, 2010).

Mesmo considerando a relação entre os fenômenos descritos, a presente pesquisa segue a proposta de divisão clássica e, portanto, contempla especificamente os movimentos de massa na forma de deslocamentos gravitacionais, envolvendo materiais, a partir da desestabilização de encostas, sendo os referidos processos de movimentos de massa em voçorocas particular a áreas em que há o registro dessas feições e considerando que na região em questão não se caracterizam ocorrências significativas de voçorocas em desenvolvimento, embora sejam constatadas as ocorrências de algumas paleovoçorocas, essa variável não foi tratada.

Neste contexto, buscou-se contemplar as terminologias que se apresentam alinhadas e adotadas pelos autores mencionados anteriormente, complementando-se. Organizou-se a sequência da classificação considerando principalmente a velocidade e o material movimentado. Primeiramente, os conceitos incidiram sobre os escoamentos, movimentos mais lentos de solo e outros detritos superficiais, passando, para aqueles caracterizados pela elevada velocidade, envolvendo solo no sentido amplo (solo propriamente dito e manto de intemperismo), colúvios, talus, outros depósitos detríticos e rocha, ou a combinação de um ou mais elementos, com destaque à corrida de lama, incluindo os deslocamentos em queda livre de blocos e fragmentos de rochas, e, por último, o tombamento e rolamento de blocos.

2.1.1.1 Rastejamento ou *creep*

Bigarella *et al.* (2003, p. 1039) descrevem rastejamento como “os movimentos vertente abaixo muito lentos sob influência da gravidade, independentemente do seu mecanismo ou gênese, deve referir apenas ao movimento imperceptível ou muito lento das vertentes, de caráter mais ou menos contínuo (*creep* na literatura inglesa)”.

Deste modo, constata-se que a característica principal do movimento denominado rastejamento é a significativa lentidão na velocidade de deslocamento dos materiais da porção superficial das encostas. “Estudos demonstram que esse movimento é maior na superfície, diminuindo gradualmente com a profundidade, chegando a ser nulo.” (CASSETI, 2005 p. 12).

Dentre os estudos confirmando a perda de intensidade do movimento à medida que a profundidade aumenta, Bigarella *et al.* (2003, p. 1041) consideram que “em geral, o rastejo do solo restringe-se aos 100 cm superiores do perfil”. Christofolletti (1980, p. 28) afirma que “a velocidade do rastejamento é maior na superfície e gradualmente diminui com a profundidade, tornando-se incapaz de desgastar ou causar abrasão nas rochas soterradas”. Para Penteado (1974, p. 100) “a velocidade do processo diminui em profundidade, chegando à zero, alguns centímetros ou decímetros abaixo da superfície”.

Penteado (*op. cit.*) observa que o “*creep* e o escoamento difuso são os principais processos que explicam a convexidade das encostas. O reflexo do rastejamento é observado na curvatura das árvores, postes inclinados, pequenos terraços ao longo das encostas” (FIGURA 1).

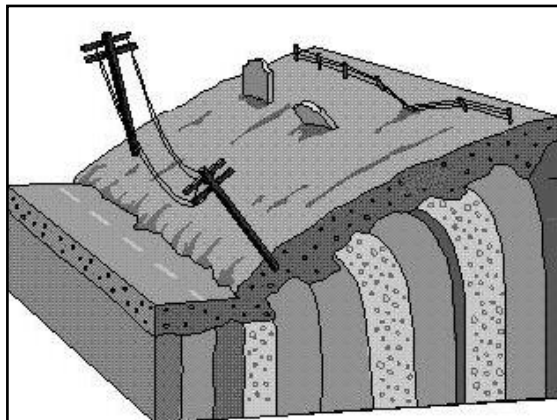


FIGURA 1 - Perfil esquemático do processo de rastejo (*creep*). FONTE: MEM (1997).

De acordo com Guidicini e Nieble (1984, p. 18):

Os rastejos são movimentos lentos e contínuos de material de encostas com limites, via de regra, indefinidos. Podem envolver grandes massas de solo, como, por exemplo, os taludes de uma região, sem que haja, na área interessada, diferenciação entre material em movimento e material estacionário. A movimentação é provocada pela ação da gravidade, intervindo, porém, os efeitos devidos às variações de temperatura e umidade. O fenômeno de expansão e de contração da massa de material, por variação térmica, se traduz em movimento, encosta abaixo, numa espessura proporcional à atingida pela variação de temperatura. Abaixo dessa profundidade, somente haverá rastejo por ação da gravidade.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT (1991, p. 17) classifica o rastejo como “movimentos lentos (poucos centímetros por ano), estando associados a alterações climáticas sazonais. Pode ainda preceder movimentações mais rápidas, como os escorregamentos”. “Massas em processo de rastejo, que atinjam taludes mais íngremes, poderão bruscamente passar ao estado de escorregamento, principalmente no caso de rastejo de rochas.” (GUIDICINI; NIEBLE, 1984, p. 20).

Podendo afetar extensas áreas e com capacidade de mobilizar qualquer tipo de material, solo, rocha ou ambos misturados, sobretudo nos horizontes superficiais das encostas, “o rastejo pode ocorrer em regiões como a Serra do Mar, com sua cobertura generalizada de solos residuais e acumulações de tálus, que representam um meio ambiente ideal à sua existência.” (GUIDICINI; NIEBLE, *op. cit.*).

2.1.1.2 Solifluxão

A solifluxão refere-se ao movimento lento das camadas superficiais, semelhante ao rastejamento, porém, com velocidade um pouco maior no processo de deslocamento do solo encosta abaixo.

De acordo com Penteado (1974, p. 100) “é o movimento de massa do solo encharcado, de alguns decímetros por ano, comum nas regiões periglaciais, com deslocamento da camada superior degelada. Fora da zona fria ocorre em vertentes de declive, entre 14 a 26%. Serve de lubrificante uma camada de argila encharcada ou camada rochosa basal impermeável.”

Christofolletti (1980, p. 29) afirma que “a solifluxão corresponde aos movimentos coletivos do regolito quando este se encontra saturado de água. Ocorre quando a presença de uma camada impermeável do regolito impede a penetração da água, provocando a concentração e saturando a camada sobrejacente”. Em análise mais detalhada sobre a solifluxão, Bigarella *et al.* (2003, p. 1046) consideram que este processo:

Constitui um tipo de movimento de massa dentro da capa superficial, que ocorre quando se processa o encharcamento do manto de intemperismo. A massa saturada de água começa solifluir lentamente como corpo viscoso de extrema plasticidade, movimentando em desordem uma massa de clásticos finos em mistura com material bastante grosseiro. A massa solifluente desloca-se lentamente vertente abaixo em consequência do próprio peso. **Na solifluxão é essencial, apenas, a presença de uma camada impermeabilizante, que não permita a infiltração das águas a maiores profundidades, promovendo assim a saturação e a perda de estabilidade da parte superior do regolito. Ocorre nas mais variadas declividades das vertentes, dependendo apenas da ocorrência de pluviosidade suficiente para promover o encharcamento do solo.** (Grifo nosso).

2.1.1.3 Corridas de Massa (*debris flow*)

A modalidade de movimentos de massa caracterizados pela velocidade no processo de escoamento de solo ou composto de solo e rocha, com massa de aspecto viscoso, denominadas corridas de massa “abrange uma gama variada de denominações na literatura nacional e internacional (corrida de lama, *mud flow*, corrida de detritos, fluxo de detritos, corrida de blocos, *debris flow*, etc.), principalmente em função de suas velocidades e das características dos materiais que mobilizam.” (CARVALHO *et al.*, 2007, p. 40).

Conforme Bigarella *et al.* (2003, p. 1049) “são formas rápidas de escoamento de fluidos viscosos, com ou sem uma superfície definida de movimentação. De caráter hidrodinâmico, são ocasionadas pela perda de atrito interno, em virtude da destruição da estrutura, em presença de excesso de água.” (FIGURA 2).

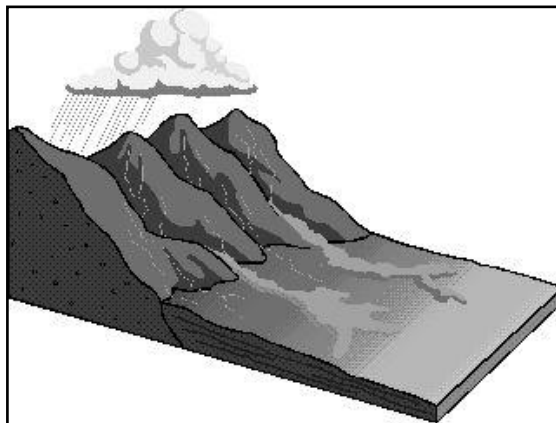


FIGURA 2 - Perfil esquemático do processo de corridas de massa (*debris flow*). FONTE: MEM (1997).

De acordo com o IPT (1991, p. 23) os processos de corridas são,

Gerados a partir de um grande aporte de material para as drenagens. Este aporte, combinado com um determinado volume d'água, acaba formando uma massa com um comportamento de líquido viscoso, de alto poder destrutivo e de transporte, e extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas. São causadas por índices pluviométricos excepcionais, são mais raras que outros movimentos de massa, porém com consequências destrutivas maiores.

Fernandes e Amaral (2000, p. 130) consideram as corridas (ou fluxos) como movimentos rápidos, em que os materiais se comportam como fluídos altamente viscosos, associados com a grande concentração de água superficial. Suguio (2003, p. 347) salienta que “a designação fluxo de detritos, às vezes, é usado como sinônimo de corrida de lama e que materiais desse tipo são encontrados em depósitos de leques aluviais, formados por material detrítico heterogêneo (areia, silte, argila e até seixos), declive abaixo”.

Guidicini e Nieble (1984, p. 26) classificam as corridas de acordo com o grau de fluidez e admitem que:

As corridas de terra ocorrem geralmente sob determinadas condições topográficas, adaptando-se às condições do relevo, são geralmente provocadas por encharcamento do solo por pesadas chuvas ou longos períodos de chuva de menor intensidade. Ocorrem em formas topográficas menos abruptas, pois são muito influenciados pelas características de resistência do material.

As corridas de lama são movimentos de massa relativamente mais rápidos, comparando-se aos anteriores, pouco abordado entre os estudos relacionados a esses

processos e, portanto, sem aprofundamento específico. Para Passos (2012) esses processos “caracterizam-se pela afluência de grande quantidade de material, em geral proveniente de escorregamentos rápidos que ocorrem a montante e fluem para a drenagem existente. A parte argilosa deste material se mistura com a água formando um líquido viscoso (lama), com alta plasticidade que flui para as partes baixas. Pela sua velocidade e densidade elevadas possui alto poder destrutivo e extenso raio de ação, conferindo ao fenômeno características que se assemelham a energia das avalanches. (Informação verbal)⁵.

Em algumas situações, de acordo com as condições físicas de uma determinada área, podem ocorrer movimentos de massa múltiplos, uma combinação de dois ou mais processos simultâneos ou separados por curto espaço de tempo, até mesmo um movimento pode ser responsável direto pelo desencadeamento de outros, podendo ser classificados como movimentos complexos.

De acordo com Guidicini e Nieble (1984, p. 48):

Um processo considerado múltiplo abrange todos os fenômenos de movimentação onde, durante sua manifestação, ocorra uma mudança de características morfológicas, mecânicas ou causais. É o caso, por exemplo, de rastejos de detritos de talus, que, com o aumento do teor de água, passam a corridas, que, por diminuição do teor de água passam a rastejos, ou ainda de rastejos, que, por variação da inclinação da encosta, passam a escorregamentos e assim por diante.

As corridas e os movimentos complexos, sobretudo na Serra do Mar, estão relacionados também, ao fenômeno conhecido popularmente como “cabeças d’água” quando extremos pluviométricos, na forma de chuvas orográficas e/ou convectivas, ocorrem no terço superior das encostas, onde concentram-se as nascentes dos rios, causando aumento excepcional do volume de água dos canais fluviais, que desce encosta abaixo com efeito de avalanche, carregando material de toda ordem, como: solo, areia, cascalhos, galhos, troncos de árvores e construções, deixando um rastro de destruição e em alguns casos, vítimas fatais. Normalmente a população local identifica os fenômenos com antecedência ao observar folhas e galhos no rio, além da modificação na coloração da água.

⁵ PASSOS, E. Comunicação pessoal em Junho de 2012 (aula de campo).

2.1.1.4 Escorregamentos

O IPT (1991, p. 19) caracteriza os escorregamentos como “movimentos rápidos, com limites laterais e profundidade bem definidos, com geometria que pode ser circular, planar ou em cunha, sendo que o principal agente deflagrador destes processos são as chuvas”. Quanto ao material envolvido, a MINEROPAR, (2010, p. 27) destaca que “pode ser constituído por solo, solo e rocha ou apenas rocha”.

De acordo com Guidicini e Nieble (1984, p. 27) escorregamentos “são rápidos, de duração relativamente curta, de massas de terreno geralmente bem definidas quanto ao seu volume, cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora do talude”. De forma semelhante, Fernandes e Amaral (2000) consideram os escorregamentos (*slides*) como a classe de maior importância dentre todas as formas de movimentos de massa, referindo-se a estes como:

Movimentos rápidos de curta duração, com plano de ruptura bem definido, permitindo a distinção entre o material deslizado e aquele não movimentado. São feições longas, podendo apresentar 10:1, comprimento-largura. São geralmente divididos com base no tipo de material movimentado, que pode ser constituído por solo, rocha, por uma complexa mistura de solo e rocha ou até mesmo por lixo doméstico e em sua forma do plano de ruptura, em rotacionais (*slumps*) que possuem uma superfície de ruptura curva, côncava para cima, ao longo da qual se dá o movimento rotacional da massa do solo e translacionais, que representam a forma mais frequente entre todos os tipos de movimentos de massa. Possuem superfície de ruptura com forma planar a qual acompanha, de modo geral, descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas existentes no interior do material. Na grande maioria das vezes, ocorrem em períodos de grande precipitação.

Guidicini e Nieble (1984, p. 31) salientam que “enquanto escorregamentos rotacionais ocorrem em geral em taludes mais íngremes e possuem extensão limitada, os translacionais podem ocorrer em taludes mais abatidos e são geralmente extensos, atingindo até milhares de metros.”

Considerando a morfologia, o IPT (1991, p. 19) classifica os escorregamentos de acordo com sua “geometria em circular, planar ou em cunha, em função da existência ou não de estruturas ou plano de fraqueza nos materiais movimentados, que condicionem a formação de superfícies de ruptura.” (FIGURA 3: A e B).

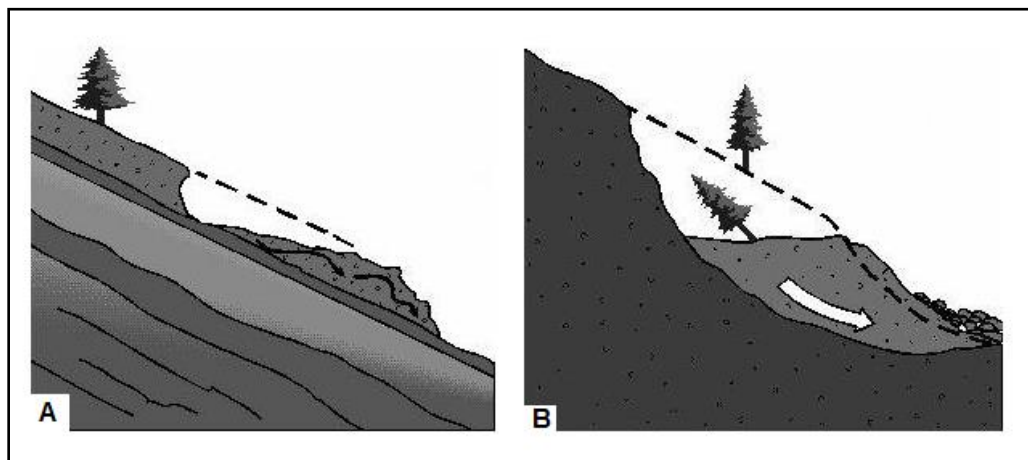


FIGURA 3 - Perfil esquemático do processo de escorregamento. (A) escorregamento planar ou translacional e (B) escorregamento circular ou rotacional. FONTE: MEM (1997).

Para Bigarella *et al.* (2003, p. 1053):

Os escorregamentos sempre se fazem ao longo de superfícies de cisalhamento côncavas, sobre as quais a massa em movimento apresenta um comportamento rotacional. São comuns nos mantos de intemperismo espessos, bem como em sequências de rochas siltico-argilosas (lamitos), ocorrendo igualmente em rochas duras muito fraturadas.

É interessante destacar que muitos autores consideram escorregamentos como sinônimo de deslizamentos, nesse aspecto, Rebelo (2010, p. 59 - 60) admite que “deslizamentos ou escorregamentos são semelhantes aos desabamentos, no entanto são menos bruscos, podem se desencadear na sequência de rupturas naturais e artificiais e exigem quase sempre a presença de água”. Para Bigarella *et al.* (2003, p. 1053) “os escorregamentos, os deslizamentos e os desmoronamentos possuem em comum uma superfície definida ao longo da qual o movimento tem lugar”. Portanto, os movimentos mencionados guardam semelhanças significativas entre si.

Christofolletti (1980, p.29) em seu trabalho sobre os processos e formas de vertentes utiliza a terminologia deslizamentos e não escorregamentos e os define como:

Deslocamentos de uma massa do regolito sobre uma estrutura saturada de água. A função de nível de deslizamento pode ser dada por uma rocha sã ou por um horizonte do regolito possuidor de maior quantidade de elementos finos, de siltes ou argilas, favorecendo atingir de modo mais rápido o limite de plasticidade e o de fluidez.

Os escorregamentos, que tem papel relevante na evolução das encostas, são originados principalmente pela ação das chuvas, portanto, considera-se que no verão, período caracterizado pelos elevados índices pluviométricos no Sul e Sudeste brasileiro, processos dessa natureza multiplicam-se, principalmente nas áreas serranas.

2.1.1.5 Desmoronamentos

Os desmoronamentos também são caracterizados pela elevada velocidade no deslocamento de materiais da encosta e, portanto, são classificados como movimentos rápidos. Christofolletti (1980, p. 29) considera os desmoronamentos como “deslocamento rápido de um bloco de terra, quando o solapamento criou um vazio na parte inferior da vertente. Geralmente ocorrem em vertentes íngremes, sendo comuns nas margens fluviais e em muitos cortes de rodovias e ferrovias.”

Conforme Bigarella *et al.* (2003, p. 1055) os desmoronamentos “se fazem ao longo de planos de cisalhamento planares, sobre os quais a massa em movimento, geralmente fragmenta-se em muitos blocos. representam a forma mais comum de remoção de massa. Iniciam na parte superior da vertente transformando-se numa avalanche na parte inferior da encosta.”

Os mesmos autores afirmam ainda que “grandes desmoronamentos chegam a deslocar milhões de metros cúbicos de material, atingindo velocidades de mais de 100 Km/h, transportando material a quilômetros da origem. Nesse processo a rocha é fragmentada e reduzida a fragmentos de tamanho menor.”

2.1.1.6 Queda de Blocos

De acordo com Guidicini e Nieble (1984, p. 42) “são movimentos rápidos, que ocorrem em penhascos verticais, ou taludes muito íngremes, onde blocos e/ou lascas de rocha, deslocados do maciço por intemperismo, caem por ação da gravidade, sem a presença de uma superfície de movimentação, na forma de queda livre.” Segundo Fernandes e Amaral (2000, p. 147) “ocorrem nas encostas íngremes de paredões

rochosos e contribuem decisivamente para a formação de depósitos de tálus.” (FIGURA 4).

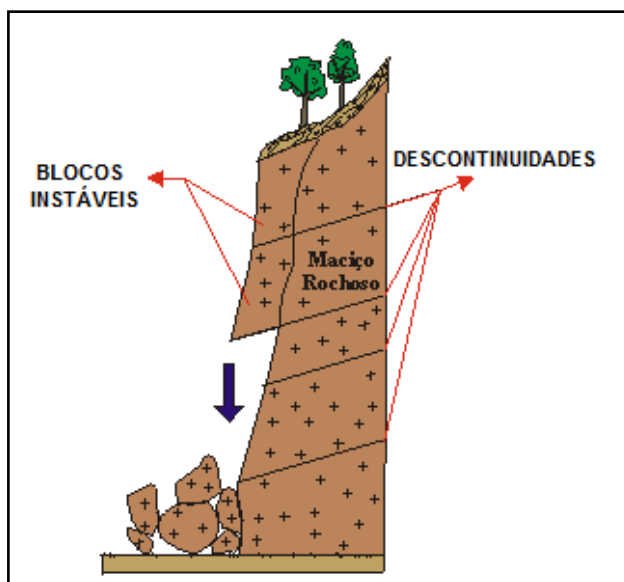


FIGURA 4 - Perfil esquemático do processo de queda de blocos. FONTE: Reis (2001).

Para o IPT (1991 p. 21),

Os movimentos tipo queda são extremamente rápidos, (da ordem de m/s) e envolvem blocos e/ou lascas de rochas em movimento tipo queda livre. A ocorrência destes processos está condicionada à presença de afloramentos rochosos em encostas íngremes, sendo potencializados pelas amplitudes térmicas, através da dilatação e contração da rocha, e por descontinuidades (fraturas, planos de fraqueza), que liberam blocos/lascas de rocha.

Guidicini e Nieble (1984, p. 42) destacam que “a queda pode ser combinada com outros movimentos, como: saltos, rotação de blocos, ações de impacto no substrato, disso resultando uma fragmentação e uma diminuição de dimensão com o progresso da movimentação.”

Os blocos desprendidos e deslocados, principalmente pelo efeito da gravidade, podem desencadear deslocamentos de outros materiais encosta abaixo, até seu nível de base. Bigarella *et. al.* (2003 p. 1057) Salientam que “nas vertentes altas e íngremes, quando as fraturas são suficientemente amplas, grandes blocos rochosos podem cair, deslocando ao mesmo tempo outros fragmentos, de sorte a formar uma acumulação de detritos no sopé da vertente.”

Além da queda de blocos, ocorrem dois outros movimentos envolvendo afloramentos rochosos: o rolamento e o tombamento de blocos (FIGURAS 5: A e B).

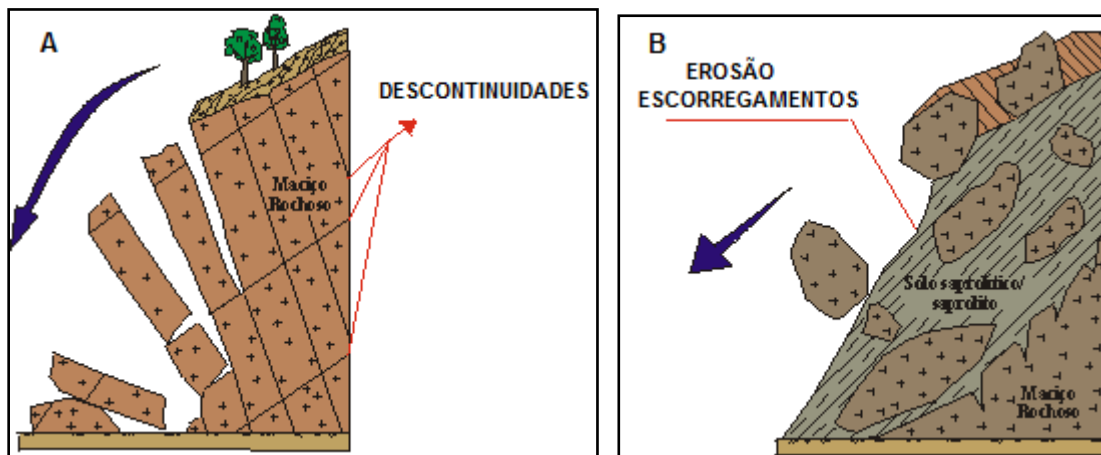


FIGURA 5 - (A) Perfil esquemático do processo de tombamento de blocos rochosos. (B) Perfil esquemático do processo de rolamento de blocos rochosos. FONTE: Reis (2001).

O tombamento é também conhecido como basculamento, acontece em encostas/taludes íngremes de rocha, com descontinuidades (fraturas, diaclases) verticais. Em geral, são movimentos mais lentos que as quedas e ocorrem principalmente em taludes de corte, onde a mudança da geometria acaba desconfiando estas descontinuidades, propiciando o tombamento das paredes do talude. (CARVALHO *et al.* 2007, p. 38-39).

O rolamento de blocos ou rolamento de matacões é classificado pelo IPT (1991, p. 21) como:

Um processo comum em áreas de rochas graníticas, onde existe maior predisposição a origem de matacões de rocha sã, isolados e expostos em superfície. Estes ocorrem naturalmente quando processos erosivos removem o apoio de sua base, condicionando um movimento de rolamento de bloco.

Especialistas consideram ainda outra classe intermediária entre a queda de blocos e os escorregamentos, de menor importância na composição dos movimentos caracterizados pelo deslocamento em queda livre de blocos ou lascas rochosas, denominado de queda de detritos. Guidicini e Nieble (1984, p. 42) definem esse processo como “sendo a queda, relativamente livre, de reduzidas massas de fragmentos terrosos ou rochosos, inconsolidados, ou pouco consolidados em movimentos de pequena magnitude”.

2.2 PRINCIPAIS CONDICIONANTES E DESENCADEANTES DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Os movimentos gravitacionais de massa são eventos que ocorrem em função de uma complexa relação entre uma série de fatores condicionantes intrínsecos, esses são elementos do meio físico ou biótico que diminuem a resistência do solo ou da rocha e, portanto interferem diretamente na estabilidade das vertentes. Por sua vez, para o desencadeamento dos processos, forças externas ao terreno como as precipitações ou sismos atuam na deflagração dos fenômenos.

Conforme Zêzere (2005) definir qual a causa que esteve na origem de determinado movimento de massa é uma ação complexa, pois há diversos fatores envolvidos, podendo alguns deles estar na origem da redução do grau de estabilidade da vertente, enquanto outros poderão ser responsáveis pelo desencadeamento do movimento.

Por fatores de predisposição compreende-se todos aqueles que são inerentes e estáticos ao terreno, que condicionam o grau de instabilidade potencial das vertentes, sendo estes determinantes na variação espacial do grau de suscetibilidade da vertente à instabilidade. Neste contexto, integram-se os fatores geológicos, morfológicos e de ocupação do solo. Os fatores desencadeantes são a causa imediata da instabilidade, ou seja, desencadeiam o movimento. Estes integram determinados processos físicos como a precipitação, os abalos sísmicos e determinadas atividades antrópicas. São os fatores que irão determinar o ritmo temporal dos movimentos de massa.

Para Fernandes e Amaral (2000, p. 147) “várias feições podem atuar como fatores condicionantes, determinando a localização espacial dos movimentos de massa. Muitas destas feições possuem sua origem associadas a processos geológicos e geomorfológicos.”

De acordo com Bigarella *et al.* (2003, p. 1026):

As condições que favorecem os movimentos de massa dependem principalmente da estrutura geológica, da declividade da vertente (forma topográfica), do regime de chuvas (em especial de episódios pluviais intensos), da perda de vegetação e da atividade antrópica, bem como pela existência de espessos mantos de intemperismo, além da presença de níveis ou faixas impermeáveis que atuam como planos de deslizamentos.

Nesse sentido, para a sistematização dos fatores condicionantes aos movimentos de massa e também do fator desencadeante pluviosidade utilizou-se de referencial teórico conceitual específico à temática, conforme descrito a seguir:

2.2.1 Geologia

As características geológicas, como a composição física e química dos tipos de rochas e as propriedades mecânicas, sob a ação de diferentes meios morfoclimáticos, interferem diretamente na instabilidade dos terrenos. Bigarella *et al.* (2003, p. 1026) consideram entre os fatores geológicos condicionantes, “os aspectos litológicos; os padrões de fraturas e diaclases; o manto de intemperismo; coesão e peso por unidade do material formador das vertentes; circulação das águas e os esforços de cisalhamento.”

Conforme o IPT (1991, p. 15) “o tipo de solo/rocha determina a suscetibilidade dos terrenos à erosão, em função de suas características granulométricas (argilosos, siltosos e arenosos), estruturais, de espessura, etc.”

Os processos de intemperismo e de escoamento superficial comportam-se de acordo com a natureza das rochas. Para Penteado (1974, p. 23) “as propriedades básicas de uma rocha são: grau de coesão, de permeabilidade e de plasticidade, essas propriedades influem no modo de escoamento superficial, na desagregação mecânica e na composição química.”

Segundo Bigarella *et al.* (2003, p. 1027):

Os padrões de diaclases e de fraturas, bem como de qualquer plano de descontinuidade desempenham papel importante na infiltração e na circulação das águas e, portanto na intemperização das rochas. A rede de diaclasamento é de grande importância para os deslocamentos maciços. O intemperismo é mais rápido e mais profundo, onde o sistema de diáclases é mais concentrado ou onde a rocha é menos resistente. O adensamento e o arranjo da rede de diáclases acentuam a movimentação do material da encosta. Os movimentos de massa parecem ser mais frequentes nas áreas de regolito mais espesso, porém podem ocorrer também em áreas com manto de intemperismo pouco espesso. No primeiro caso, o movimento é constituído principalmente de material alterado, enquanto no segundo é formado essencialmente de blocos de rochas.

Ainda nessa perspectiva, Fiori e Carmignani (2009, p. 361-362) afirmam que:

A estabilidade e a deformidade de maciços rochosos dependem, em grande parte, da presença de descontinuidades (planos de fraqueza) nas rochas. As mais comuns são representadas por juntas, falhas, contatos litológicos e foliações metamórficas. Fatores geológicos como a mineralogia, textura, granulometria e material cimentante afetam de forma significativa a resistência e a deformidade. Por exemplo, rochas que apresentam engranzamento dos minerais, como as ígneas, representam uma resistência maior do que rochas clásticas, nas quais os grãos minerais apenas se tocam. O intemperismo químico altera as propriedades geotécnicas das rochas em um grau que depende do tipo de rocha, clima e tempo. Além disso, há ainda uma diminuição da resistência mecânica da rocha por causa do movimento da água através das descontinuidades, gerando pressões neutras e hidrostáticas.

Guidicine e Nieble (1984, p. 51) acrescentam as variações de temperatura como agente importante na desagregação e possível movimentação de material rochoso. Destacam que as oscilações térmicas diárias ou sazonais provocam variações volumétricas em massas rochosas, podendo conduzir a destaque de blocos, se o bloco estiver sobre um plano inclinado, pode resultar em movimentação. Se a resistência ao cisalhamento for ultrapassada, haverá escorregamento.

Especificamente referindo-se à litologia e a resistência das diferentes classes aos processos de denudação e morfogênese, portanto correlatos aos movimentos de massa, Crepani *et al.* (2001) elaboraram estudo voltado ao Zoneamento Ecológico-Econômico dos estados amazônicos a partir da geração de cartas de vulnerabilidade natural à perda de solo. A pesquisa contou com análises de resistência das rochas à denudação (intemperismo e erosão) e também a avaliação dos componentes minerais e químicos resultando na proposta de resistência morfodinâmica das rochas.

O estudo destaca que a contribuição da Geologia para a análise e definição da categoria morfodinâmica da unidade de paisagem natural compreende as informações relativas à história da evolução geológica do ambiente onde a unidade se encontra, e ao grau de coesão das rochas que a compõem. Como toda rocha é um agregado de minerais, sua resistência ao intemperismo vai depender da resistência ao intemperismo dos minerais que a compõem, bem como da resistência à desagregação entre os minerais.

Considerando os três grupos de rochas, ígneas, metamórficas e sedimentares e de acordo com a composição química dos minerais que as integram, Crepani *et al.* (2001) indicaram uma ordenação decrescente de resistência à denudação, conforme sistematizado no QUADRO 1.

Ígneas	Riolito → Granito → Dacito → Granodiorito → Quartzo Diorito → Fonólito → Nefelina → Sienito → Traquito → Sienito → Andesito → Diorito → Basalto → Anortosito → Gabro → Peridotito → Piroxenito → Kimberlito → Dunito.
Metamórficas	Quartzito → Granulito → Migmatitos → Gnaisses → Milonitos → Xistos → Anfibolitos → Filitos → Ardósia → Mármore.
Sedimentares	Arenito Quartzoso → Conglomerados → Subgrauvaca → Grauavaca → Silitos → Argilito → Folhelho → Margas → Dolomito → Calcários → Evaporitos → Sedimentos Inconsolidados.

QUADRO 1 - ESCALA COM CLASSIFICAÇÃO DECRESCENTE DE RESISTÊNCIA A DENUDAÇÃO DOS TRÊS TIPOS DE ROCHAS.

FONTE: Crepani *et al.* (2001).

Comparando os três tipos de rochas, Crepani *et al.* (2001) consideraram as sedimentares mais vulneráveis, ou seja, menos resistentes ao intemperismo e erosão, seguido pelas metamórficas e portanto, classificando as ígneas como mais resistentes. O estudo elaborou uma classificação das rochas mais comuns, com valores variando de 1 (mais resistente) a 3 (menos resistente) aos processos de denudação com variações decimais (anexo 1). Em pesquisa voltada a análise das unidades ecodinâmicas da paisagem, Silveira (2005) adotou os valores descritos.

2.2.2 Pedologia

Além dos solos estarem correlacionados a outros condicionantes de instabilidade das vertentes como a geologia e a geomorfologia, estes configuram-se como fator individual que influencia e sofre ação dos fatores erosivos, em função de suas propriedades inerentes: textura, estrutura, permeabilidade e densidade.

Conforme Bigarella *et al.* (1996, p. 490) “a textura do solo refere-se à proporção relativa das partículas sólidas presentes na massa de solo, influenciando na capacidade de infiltração e absorção de água da chuva.” Ainda nesta perspectiva, Salomão (1999, p. 76) afirma que “solos mais arenosos são mais porosos, permitindo rápida infiltração da água, e, conseqüentemente, menor capacidade de armazenamento.”

Com relação à estrutura Bigarella *et al.* (1996, p. 492) consideram que esta “caracteriza o arranjo dos constituintes do solo. Compreende a reunião das partículas em agregados, os quais apresentam formatos e tamanhos variados, estando separados uns dos outros por superfícies de fraqueza, influencia na velocidade e direcionamento de infiltração da água.”

Quanto à permeabilidade e a porosidade, para Fiori e Carmignani (2009, p. 21) “são propriedades que estão diretamente ligadas e são inversamente proporcionais à densidade, que representa a relação entre o volume e massa total do solo. Neste contexto, subentende-se que, em geral, os solos arenosos são mais permeáveis do que solos argilosos.”

Seguindo os preceitos de Tricart (1977) para qual a vulnerabilidade ao intemperismo e erosão são aplicados com base em sua teoria da ecodinâmica, em que as unidades de paisagem consideradas estáveis são aquelas com predomínio da pedogênese e instáveis com predomínio da morfogênese, e particularmente referindo-se a resistência dos diferentes tipos de solo aos processos erosivos, destacam-se as contribuições de Ross (1991, 1994 e 2000), da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM (2003), Crepani *et al.* (2001) e Silveira (2005), que de modo geral, classificam como de maior fragilidade ou erodibilidade, os solos Litólicos, Hidromórficos, Orgânicos e Areias Quartzosas; de nível intermediário, os Podzólicos e Cambissolos; e de baixa fragilidade, os Latossolos.

Entretanto, os autores citados abordam principalmente a fragilidade ambiental, com ênfase na erosão superficial na forma de sulcos, ravinas e voçorocas e não os movimentos de massa gravitacionais propriamente ditos. Consideram inclusive o estado de desenvolvimento do solo e a área de ocorrência, associando-a com a declividade, por exemplo.

Particularmente referindo-se aos movimentos de massa, Fernandes e Amaral (2000, p. 157) destacam que:

Várias discontinuidades podem estar presentes dentro do saprolito e do solo residual. Estas incluem, principalmente, feições estruturais relíquias do embasamento rochoso (fraturas, falhas, bandamentos etc.) e atuação de processos pedogenéticos. Essas discontinuidades podem atuar de modo decisivo no condicionamento das poro-pressões no interior da encosta e, conseqüentemente, na sua estabilidade.

De acordo com Bigarella *et al.* (2003, p. 1030 - 1031):

A espessura do manto, sua natureza argilosa impermeável e o pequeno conteúdo de matéria orgânica dos solos tropicais tornam-nos excepcionalmente suscetíveis aos movimentos de massa. Apenas os latossolos mais permeáveis e os capeamentos lateríticos são mais resistentes aos processos erosivos. Minerais de argila no perfil do solo contribui para aumentar a instabilidade da vertente. A alta pluviosidade saturando o solo com água favorece uma sobrecarga e contribui para a lubrificação dos planos de cisalhamento. Quando um movimento de massa tem início, não escorrega apenas o material detrítico intemperizado, mas também o material rochoso da parte superior da vertente é incluído no movimento”.

A partir das premissas apresentadas, considera-se que as propriedades dos solos superficiais e subsuperficiais, assim como a composição litológica subjacente interferem na estabilidade das vertentes como agentes passivos, além de serem fatores de influência na predisposição das encostas aos movimentos de massa e processos erosivos superficiais e de representarem o próprio material envolvido.

2.2.3 Geomorfologia

As condições de instabilidade para a ocorrência de processos erosivos e também de movimentos coletivos, em taludes e encostas, estão diretamente associadas aos condicionantes geomorfológicos: declividade, altitude, forma da vertente e orientação da vertente, sendo:

2.2.3.1 Declividade

A declividade é um dos fatores geomorfológicos que determinam a instabilidade das encostas, portanto a análise deste aspecto permite o reconhecimento da distribuição das inclinações na superfície e conseqüentemente possibilita a análise do balanço de retirada, transporte de deposição de materiais na superfície. De acordo com Crepani *et al.* (2001, p. 75) “quanto maior a declividade mais rapidamente a energia potencial das águas pluviais transforma-se em energia cinética e maior é, também, a velocidade das massas de água e sua capacidade de transporte, responsáveis pela erosão que esculpe as formas.”

Segundo o IPT (1991, p. 15) “maiores declividades determinam maiores velocidades de escoamento das águas, aumentando sua capacidade erosiva; e o maior comprimento da encosta implica maior tempo de escoamento e, conseqüentemente, maior erosão.”

Bigarella *et al.* (2003, p. 1031- 1032) salientam que:

O movimento de massa é basicamente influenciado pela morfologia da vertente. A altura desta, bem como a sua inclinação constituem fatores importantes a serem considerados na análise do problema. No Brasil, todos os eventos catastróficos relacionados com os movimentos de massa ocorreram em áreas de alta declividade. As áreas críticas são aquelas dos terrenos montanhosos, como os da Serra do Mar. Em vertentes com declividades superiores a 40° formam-se grandes escamas rochosas protegidas em parte da meteorização pelo próprio declive. Entretanto, nos planos de diaclasamento e de fratura a ação do intemperismo se faz sentir originando faixas de materiais alterados separando fatias rochosas inalteradas ou pouco intemperizadas. Nesses locais, o excesso de água e a ação da gravidade desempenham um papel importante no deslocamento maciço veloz, quase seco de material de baixíssima plasticidade.

É consenso que a declividade é um importante fator condicionante de instabilidade das vertentes e conseqüentemente da ocorrência dos movimentos de massa. Mesmo sendo difícil estabelecer ângulos considerados limites, alguns estudos indicam parâmetros de declividade considerados mais suscetíveis à ocorrência dos processos.

Em pesquisa realizada na Serra do Mar, litoral paulista, região de Caraguatatuba, Cruz (1974, p. 160) afirma que “as vertentes mais atingidas por escorregamentos são as que apresentam mais fortes declives, acima de 40%; escorregamentos em declives menos íngremes estão relacionados às zonas de concentração de drenagem.” Sidle *et al.* (1985, p. 67) consideram que “a maioria dos taludes com ângulos maiores que 25° (47%) podem apresentar movimentação mais rápida do que aqueles onde os valores são inferiores a esse.”

A Secretaria do Meio Ambiente de São Paulo (1990) considera que acima de 25° (47%) a possibilidade de ocorrência de movimentos de massa é maior. Acima de 60°, embora sendo o regolito menos espesso, o que teoricamente reduziria as possibilidades, também há registros destes fenômenos. Kozciak (2005, p. 28) admite que “a declividade deve sempre estar associada a outros atributos existentes para

análises de processos desta natureza”. A autora apresenta uma associação entre classes de declividade e alguns tipos de movimentos de massa, elaborada por Sidle *et al.* (1985) (TABELA 1).

TABELA 1 - CLASSES DE DECLIVIDADE ASSOCIADAS A DIFERENTES TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA.

TIPOS DE PROCESSOS	CLASSES DE DECLIVIDADE	
	GRAUS	PERCENT.
Rastejo	1,3 a 25	2,3 a 47
Escoamentos rápidos em solos	4 a 20	7 a 36,3
Escoamento rotacionais	7 a 18	12,2 a 32,4
Escoamentos rápidos em solos e detritos sobrejacentes a rocha	> 25	> 47

FONTE: Sidle *et al.* 1985 *apud* Kozciak (2005).

Geralmente, para representação cartográfica da declividade é estabelecido uma divisão em intervalos de classes. Algumas pesquisas reconhecidas utilizaram-se deste método, citam-se: Análises de Fragilidade dos Ambientes, Ross (1991, 1994 e 2000), que considerou os intervalos de classes, 0-6%, 6-12%, 12-20%, 20-30% e >30%; Zoneamento Ecológico-Econômico dos Estados da Amazônia legal, Crepani *et al.* (2001) <2%, 2-6%, 6-20%, 20-50% e >50%; Zoneamento Geoambiental da Região de Irauçuba/CE; CPRM (2003) 0-3%, 3-8%, 8-20%, 20-45% e >45%; Aspecto Normativo e Sentido Técnico; Biase (1995) <5%, 5-12%, 12-30%, 20-47 e >47%; Estudo das Unidades Ecodinâmicas da APA de Guaratuba/PR e Zoneamento Ambiental da Bacia do Rio Marumbi – PR, respectivamente, Silveira (2005) e Cunico (2007), que utilizaram os mesmos intervalos de classes do autor anterior.

Em linhas gerais, os estudos citados dedicados à análise de fragilidade e vulnerabilidade ecodinâmica, consideram de alto potencial às declividades superiores a 30% e muito alto às declividades acima de 47%.

2.2.3.2 Altitude

A altitude, condicionante muito utilizado em trabalhos que abordam a temática em questão é um fator relevante, porém sem limites precisos que determinam a

instabilidade das vertentes. Bigarella *et al.* (2003, p. 1032) reportam-se ao trabalho de Aguiar e Silva (1991) referente à ocorrência de escorregamentos em Cubatão-SP, estes “verificaram que a maior frequência se situava entre 150 e 750m, especialmente entre 300 e 450m, sendo que abaixo e acima, os movimentos teriam sido poucos frequentes.”

Crepani *et al.* (2001, p. 74) afirmam que:

Quanto maior a amplitude altimétrica maior é a energia potencial, pois as águas das precipitações pluviais que caem sobre os pontos mais altos do terreno adquirirão maior energia cinética no seu percurso em direção às partes mais baixas e, conseqüentemente, apresentarão maior capacidade de erosão ou de morfogênese. A amplitude altimétrica é obtida pelo cálculo da diferença entre as cotas máxima e mínima contidas na unidade de paisagem natural, realizado a partir dos dados de altimetria das cartas topográficas.

Os mesmos autores, ao atribuírem valores de vulnerabilidade de acordo com a amplitude altimétrica, com variação entre 1,0 e 3,0, definiram que: próximos a 1,0 existe estabilidade nas encostas, próximos de 2,0 são valores medianos e próximos a 3,0 valores que representam vulnerabilidade. Neste estudo, evidenciou-se que em amplitudes a partir de 200 m, as encostas apresentam maior instabilidade. (Anexo 2).

2.2.3.3 Forma das Vertentes

De forma geral, conforme o perfil de curvatura, as vertentes são divididas em três tipos principais, convexo, côncavo e retilíneo. De acordo com Christofolletti (1980, p. 39) “o elemento convexo apresenta curvatura positiva, quando os ângulos aumentam continuamente para baixo; côncavo, tem curvatura negativa, quando os ângulos decrescem continuamente para baixo e retilíneo é um segmento sem curvatura”.

Para Bigarella *et al.* (2003, p. 972):

O relevo apresenta tipos de vertentes diversificados, desde superfícies planas suavemente inclinadas, próximas à horizontal até superfícies retilíneas, escarpadas quase verticais. A maior parte das encostas é composta de vários segmentos, geralmente seu perfil é formado por um segmento superior convexo, no qual a declividade aumenta para a jusante, seguido por um seguimento inferior côncavo com redução de declive encosta abaixo.

De acordo com Fernandes e Amaral (2000, p. 158) “a atuação indireta nos movimentos de massa e processos correlatos, está relacionada ao papel que a forma da encosta exerce na geração de zonas de convergência e divergência dos fluxos d’água superficiais e subsuperficiais”.

Considerando a classificação das formas das vertentes, conforme sua predisposição a ocorrência de processos erosivos e principalmente dos movimentos coletivos de massa, admite-se, com base na literatura, que os perfis côncavos têm maior predisposição. “As porções côncavas do relevo são segmentos preferenciais na paisagem para a ocorrência de movimentos de massa, por serem zonas de convergência de sedimentos e fluxos d’água.” (DIETRICH; DUNNE⁶, 1978; TSUKAMOTO⁷ *et al.*, 1982; RENEAU⁸ *et al.*, 1984; LACERDA; SANDRONI⁹, 1985; DIETRICH¹⁰ *et al.*, 1986. CROZIER¹¹ *et al.*, 1990; MONTGOMERY¹² *et al.*, 1991. MONTGOMERY; DIETRICH¹³, 1995, *apud* FERNANDES; AMARAL, 2000, p. 158).

⁶ DIETRICH, W. E.; DUNNE, T. Sediment Budget for a Small Catchment in Mountainous Terrain. **Zeitschrift fur Geomorphologie Supplement**, Vol. 29, 191-206pp. (1978).

⁷ TSUKAMOTO, Y.; OHTA, T.; NOGUCHI, H. Hydrological and Geomorphological Studies of Debris Slides on Forested Hillslopes in Japan. **International Association of Hydrological Scientists (IAHS)**, Vol. 137, 88-98pp. (1982).

⁸ RENEAU, S. L.; DIETRICH, W. E.; WILSON, C. J.; ROGERS, J. D. Colluvial Deposits and Associated Landslides in the Northern San Francisco Bay Area, California, USA. **Proceedings of IV International Symposium on Landslides**, Toronto, 425-430pp. (1984).

⁹ LACERDA, W. A.; SANDRONI, S. Movimentos de Massa Coluviais, **Mesa Redonda Sobre Aspectos Geotécnicos de Encostas**. Clube de engenharia, Rio de Janeiro, Vol. 3, 1-19pp. (1985).

¹⁰ DIETRICH, W. E.; WILSON, C. J.; RENEAU, S. Hollows, Colluvium and Landslides in Soil-Mantled Landscapes. In: ABRAHAMS, A. D. (ed.), **Hillslope Processes**. Allen and Unwin, London, 361-388pp. (1986).

¹¹ CROZIER, M. J.; VAUGHAN, E. E.; TIPPET, J. M. Relative Instability of Colluvium Filled Bedrock Depressions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 329-339pp. (1990).

¹² MONTGOMERY, D. R.; WRIGHT, R. H.; BOOTH, T. Debris Flow Hazard Mitigation for Colluvion-Filled Swales. **Bulletin of the Association of Engineering Geologists**, Vol 28, 303-323pp. (1991).

¹³ MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Hydrologic Processes in a Low-Gradient Source Area. **Water Resources Research**, Vol. 31, 1-10pp. (1995).

2.2.3.4 Orientação das Vertentes

A orientação das vertentes (aspecto) influencia na distribuição das áreas mais propícias aos movimentos de massa, uma vez que determina a exposição frente às variáveis climatológicas, como o vento, frequência e incidência da radiação solar, o tipo de vegetação e a umidade dos solos, fatores que interferem na estabilidade das encostas. “A orientação causa diferenças na umidade retida na vertente e, portanto, na umidade do solo. Vertentes que retêm mais umidade estão, em geral, opostas à insolação ou voltadas para a umidade transportada por ventos ou por pluviosidade.” (SESTINI, 2000, p. 25).

Dai e Lee (2002) destacam que a orientação das encostas afeta indiretamente a resistência ao cisalhamento em virtude de estar intimamente relacionada à presença de umidade e de cobertura vegetal. Outro aspecto considerável é que as precipitações estão relacionadas à direção predominante dos ventos, ou seja, a quantidade de chuva é maior nas encostas expostas a esses eventos atmosféricos.

2.2.4 Vegetação

É consenso entre muitos autores que a cobertura vegetal mantém o equilíbrio das vertentes, reduzindo a ocorrência dos processos erosivos e também de movimentos coletivos de solo, rocha ou material composto, referindo-se inclusive a frequência e intensidade dos processos. “A vegetação atua no sentido de favorecer a estabilidade das encostas, através do esforço mecânico (raízes) e redistribuição da água de chuva, diminuindo e retardando a infiltração desta no terreno, além de protegê-lo contra a erosão.” (IPT, 1991, p.27).

A presença da floresta controla o escoamento superficial e a infiltração das águas no manto de intemperismo, diminuindo a penetração excessiva da água no subsolo. A perda da vegetação expõe o solo à erosão permitindo, após chuvas prolongadas, a penetração de um excesso de água no subsolo, favorecendo o relaxamento dos esforços internos através da lubrificação dos planos de cisalhamento e, conseqüentemente, dando início aos movimentos de massa. (BIGARELLA *et al.* 2003, p. 1034).

Nesse sentido, observa-se que a vegetação protege as camadas do solo e que o desmatamento ou abertura de clareiras, pode condicionar os terrenos tanto para erosão superficial, como também aos movimentos coletivos. Guidicine e Nieble (1984, p. 62-63) descrevem a ação específica da cobertura vegetal da seguinte forma:

1. O conjunto das copas e demais partes aéreas da floresta atua de três modos principais: a) interceptando e defendendo o maciço da ação dos raios solares, dos ventos e da chuva; b) retendo substancial volume d'água da chuva, através do molhamento da ampla superfície de folhagem, galhos, troncos e epífitas associadas; c) eliminando, na forma de vapor, grande volume d'água, por meio da evapotranspiração.
2. Os detritos vegetais, em contínua acumulação no terreno da floresta, atuam hidráulicamente sob três modalidades principais: a) imobilizando boa parte da água que atinge o terreno, através de sua alta capacidade de retenção; b) promovendo, juntamente com o sistema radicular de desenvolvimento superficial, o escoamento hipodérmico, graças a sua estrutura acamada, resultante da suave deposição de fragmentos planares e alongados; c) freando o escoamento superficial.
3. O sistema radicular promove a estabilização das encostas atuando sob dois aspectos principais: a) mecânico, pode se manifestar, diretamente, através da estruturação do solo, conferindo a este um acréscimo substancial de resistência ao cisalhamento; b) hidráulico, pode se manifestar, diretamente, através do estabelecimento de escoamento hipodérmico, que desvia e/ou reduz a intensidade da infiltração efetiva no maciço.

De acordo com o IPT (1991, p. 33) “quando se remove a vegetação (qualquer que seja ela), expõe-se a superfície do terreno natural diretamente à ação da chuva, gerando, conseqüentemente, a erosão.” Portanto, considera-se a retirada da cobertura vegetal das encostas, sobretudo as mais íngremes, como dispositivo direto que contribui para a instabilidade dos terrenos e em geral, tornando-os mais suscetíveis aos processos de deslocamento de materiais vertente abaixo.

A densidade de cobertura vegetal é um fator de proteção do terreno contra os processos morfogenéticos que se traduzem na forma de erosão e movimentos de massa. Estudos do INPE, desenvolvidos por Crepani *et al.* (2001) e de ROSS (1991, 1994 e 2000) indicaram níveis de proteção do solo para determinados tipos de cobertura vegetal, o último elaborou quadro com as informações sistematizadas (anexo 3).

2.2.5 Ação antrópica

O processo de uso e ocupação da terra tem influenciado cada vez mais na dinâmica de evolução das encostas. As diversas práticas realizadas pelo homem: desmatamentos, exploração mineral, recortes nos terrenos, aterros para construção, retificação de canais fluviais, entre outras, acabam promovendo maior instabilidade de algumas encostas ou taludes, aumentando a possibilidade de ocorrência de processos erosivos ou movimentos coletivos, culminando, por vezes em eventos catastróficos, muito embora ocorram alguns casos de interferência no sentido de reverter quadros de desequilíbrio e seus efeitos negativos.

Para Bigarella *et al.* (2003, p.1035-1038) “a ação antrópica tem tido uma participação ponderável na desestabilização das vertentes da paisagem moderna. O homem ultimamente está alterando as vertentes de tal forma que ocasionalmente vastas áreas procuram um novo equilíbrio através de extensas movimentações de massa.”

Os autores salientam ainda que “eventos catastróficos, devido alta pluviosidade, ocorridos no Rio de Janeiro, no mês de janeiro de 1966 (617,6mm) e fevereiro de 1967 (432mm) não causariam a instabilidade generalizada se as áreas não tivessem sido irracionalmente ocupadas pelo homem.”

De forma objetiva o IPT (1991, p. 27) considera que as “diversas intervenções que o homem realiza no meio, como, por exemplo, cortes, aterros, desmatamentos, concentrações de águas superficiais, vibrações etc., modificam o equilíbrio das encostas, provocando sua instabilização.”

Corroborando, Passos (2000, p. 188) admite que:

Os processos de movimentos de massa, dentre os quais inúmeros aparentam ser decorrentes de processos geológicos e geomorfológicos naturais, são significativamente incrementados com a intervenção antrópica. Tais desequilíbrios se manifestam particularmente pela ação do desmatamento em áreas montanhosas mesmo que seja bastante localizada, embora ainda não existam parâmetros precisos de qual seja o seu grau de interferência na ordem natural dos fenômenos.

2.2.6 Fator Desencadeante: Pluviosidade

As condições climáticas tem envolvimento direto em aspectos relacionados à formação do relevo a partir do desgaste e transporte de solo e material rochoso, uma vez que seus elementos constituintes, a temperatura, umidade e o vento exercem energia sobre a superfície. Dentre os elementos do clima, a pluviosidade é classificada como um agente desencadeante dos movimentos de massa, pois é responsável pela detonação dos processos.

Segundo Crepani *et al.* (2001, p. 94):

A causa fundamental da denudação é a ação da chuva agindo inicialmente sobre as rochas provocando o intemperismo, e mais tarde sobre o solo removendo-o pela erosão hídrica. O impacto direto das gotas e o escoamento superficial do excesso de água da chuva (*"runoff"* ou enxurrada) são os agentes ativos da erosão hídrica, o solo é o agente passivo.

Considerado um agente externo e deflagrador, a correlação entre a pluviosidade e movimentos de massa nas encostas é evidente, índices pluviométricos elevados provocam a saturação do solo, rocha ou material composto, reduzindo a resistência à desagregação e ao cisalhamento, refletindo em perda de estabilidade. Portanto, elevados índices pluviométricos, sobretudo em vertentes íngremes, representam o principal agente natural na predisposição à ocorrência dos processos. "No Brasil eventos de grande magnitude sempre ocorrem durante períodos chuvosos." (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 2004).

Conforme o IPT (1991, p.15) "o volume d'água e sua distribuição no tempo e espaço são determinantes da velocidade dos processos erosivos". Penteado (1974, p. 113) "considera que o tipo de erosão depende da intensidade das chuvas em relação à unidade de tempo."

Para Bigarella *et al.* (2003, p. 1032-1033):

Existem circunstâncias nas quais o solo pode deslocar-se vertente abaixo, de forma maciça, isto é, como movimento de massa causado pela ação da água. Essa forma de erosão ocorre após chuvas prolongadas, principalmente em terrenos desprotegidos, onde a infiltração das águas é acentuada. Para que ocorra, é necessário que haja saturação hídrica do perfil do solo, gerando desequilíbrio acompanhado de escorregamento, lento ou rápido. O excesso de

água no subsolo afeta os materiais coloidais que, ao invés de conferirem uma resistência ao solo, tendem à sua “liquefação”. A superfície impermeável ou de cisalhamento torna-se “lubrificada”, facultando o movimento de massa.

Embora eventos de grandes proporções sejam mais comuns nos períodos de chuvas intensas, os mesmos autores destacam ainda que “esses processos não ocorrem somente diante dos excepcionalismos pluviométricos, é necessário também considerar o tempo de duração das chuvas, a condutividade hidráulica dos solos e a variação do grau de saturação.”

Nessa perspectiva, Guidicine e Nieble (1984, p. 57-62) consideram que:

Se a água percolar em grande quantidade e sem interrupção na massa de solo, o ar será quase completamente expulso, a coesão aparente eliminada e o talude entrará em colapso. Quando o maciço rochoso é intensamente fraturado, em diversas direções, a pressão da água no interior da massa rochosa pode ser tratada de maneira análoga à utilizada no caso de massas de solo, reconhecendo-se nela certa continuidade e regularidade. Entretanto, no caso de maciços rochosos pouco fraturados, a distribuição de pressões da água se fará aleatoriamente ao longo das descontinuidades.

Nas regiões intertropicais, a água das chuvas é considerada a maior força detonadora dos processos de movimentos de massa. “Sua ação pode se dar através da elevação do grau de saturação nos solos, diminuindo a resistência destes, especialmente as parcelas de resistência relacionadas às tensões capilares (e às ligações por cimentos solúveis ou sensíveis à saturação). O aumento do peso específico do solo devido à retenção de parte da água infiltrada é outro condicionante de instabilização que incide nos taludes.” (IPT, 1991, p.25).

A integração entre a chuva e o terreno, sendo este composto por solo ou rocha, resulta no intemperismo e erosão, ou seja, capacidade da chuva de desgaste e deslocamento versus resistência do solo ou rocha aos processos. Crepani *et al.* (2001, p. 95) destacam que:

O poder da chuva em causar erosão é chamado *erosividade* e é função das características físicas da chuva. As principais características físicas da chuva envolvidas nos processos erosivos são: a quantidade ou *pluviosidade total*, a intensidade ou *intensidade pluviométrica* e a *distribuição sazonal*. Dentre as três características é especialmente importante se conhecer a *intensidade pluviométrica* porque representa uma relação entre as outras duas (quanto chove / quando chove), resultado que determina, a quantidade de energia

potencial disponível para transformar-se em energia cinética. A maior importância da *intensidade pluviométrica* é facilmente verificada quando se observa que uma elevada pluviosidade anual, mas com distribuição ao longo de todo período, tem um poder erosivo muito menor do que uma precipitação anual mais reduzida que se despeja torrencialmente num período determinado do ano. O valor da intensidade pluviométrica para uma determinada área pode ser obtido dividindo-se o valor da pluviosidade média anual (em mm) pela duração do período chuvoso (em meses).

Nesse contexto, considera-se que as chuvas concentradas, mesmo em regiões onde as médias anuais são reduzidas, tem poder erosivo maior, ou seja, quanto maior a intensidade pluviométrica, maior é a vulnerabilidade dos solos aos processos erosivos, podendo ser inclusos também os movimentos coletivos.

Reconhecendo que quanto maior os valores de intensidade pluviométrica maior a erosividade da chuva, Crepani *et al.* (2001) criaram uma escala com classes de vulnerabilidade natural à perda de solo, construída a partir da distribuição linear dos valores contidos entre os intervalos possíveis de intensidade pluviométrica para as diversas regiões do país. A escala considera que áreas que apresentam menores índices pluviométricos anuais e maior duração para o período chuvoso, são estáveis e recebem valores próximos a 1,0. Em áreas com níveis intermediários de vulnerabilidade/estabilidade os valores são próximos de 2,0, e onde ocorrem maiores índices de pluviosidade anual e menor duração do período chuvoso atribuem-se valores próximos da vulnerabilidade 3,0 (anexo 4).

Em estudo de correlação entre a pluviosidade e escorregamentos na Serra do Mar, baseado no histórico de chuvas acumuladas, Guidicine e Iwasa (1976) concluíram que episódios pluviométricos superiores a 12% da média anual tendem a provocar escorregamentos. Em episódios maiores que 20% da média anual os eventos passam a ter caráter catastrófico. Foi constatado que com índices de pluviosidade acima de 250-300 mm em 72 horas os movimentos de massa são generalizados tanto em áreas alteradas quanto em áreas virgens. Nestas condições, a contribuição dos demais condicionantes fica em segundo plano.

Complementando, Wolle e Carvalho (1989) admitem que a combinação de episódios de chuvas amenas precedentes às chuvas intensas de curta ou média duração são as principais responsáveis deflagração de movimentos de massa em meio

tropical úmido. Nesse caso, 8% da pluviosidade média anual são suficientes para acarretar processos generalizados.

2.3 BREVE HISTÓRICO DOS MOVIMENTOS DE MASSA NO BRASIL

Como fenômenos naturais da dinâmica de desenvolvimento das vertentes, os movimentos de massa integram os agentes externos que modelam a superfície, assim como outros processos de intemperismo. Entretanto, suas ocorrências passaram a interessar mais a comunidade científica e a sociedade de forma geral à medida que um contingente cada vez maior da população passou a ser afetada por estes processos, de forma direta ou indireta.

Segundo Bigarella *et al.* (2003, p. 1059) “os movimentos de massa desempenharam um papel importante no desenvolvimento das vertentes das regiões tropicais e subtropicais do Brasil Sudeste e Meridional, bem como nas regiões úmidas do leste e nordeste do país.”

Suguio (2003, p. 347 – 348) observa que “os movimentos de massa, em território brasileiro, são característicos de regiões de relevo mais ou menos acidentado e com alta pluviosidade. Esses dois fatores, por outro lado, atuam com maior intensidade em regiões com maior densidade de ocupação humana.”

Sob essa ótica, observa-se que no Brasil, a incidência dos movimentos de massa está relacionada às suas características naturais, sobretudo às condições climáticas e geomorfológicas. Neste sentido, é preocupante a constatação de que na faixa litorânea, exatamente onde se localizam as grandes metrópoles do país e a densidade demográfica maior é que se têm condições naturais de instabilidade das encostas: faixa extensa escarpada, com declives acentuados e atuação das frentes frias com índices pluviométricos elevados.

De acordo com Fernandes e Amaral (2000, p. 125):

O Brasil, por sua grande extensão e diversidade de condições climáticas, está sujeito aos desastres naturais, principalmente aqueles associados às porções suscetíveis do seu relevo. Além da frequência elevada destes desastres de origem natural, ocorrem no país, também, um grande número de eventos induzidos pela ação antrópica. As metrópoles brasileiras convivem com

acentuada incidência de deslizamentos por cortes para implantação de moradias e de estradas, desmatamentos, atividades de pedreiras, etc.

Alguns relatos indicam que os primeiros estudos sobre os movimentos de massa nas encostas ocorreram à aproximadamente 2000 anos, na China e no Japão. No Brasil os primeiros relatos foram registrados ainda no período colonial, em 1671 nas encostas de Salvador na Bahia. (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 2004).

Os registros dos movimentos de massa ocorridos no Brasil aumentaram consideravelmente a partir da metade do século XX em função principalmente, dos avanços técnicos alcançados para levantamentos e análises. Para Guidicini e Nieble (1984, p. 05):

No registro da ocorrência de qualquer movimento de massa no Brasil, um fator determinante é representado pelo nível de desenvolvimento do meio técnico na época em que ocorria o acontecimento... Os movimentos de massa podem ocorrer, de maneira isolada, no tempo e no espaço ou, então, se concentrar em ocorrências praticamente simultâneas, afetando regiões inteiras. São deste último tipo os episódios catastróficos que, em época recente, atingiram a Serra de Caraguatatuba (1967), a Serra das Araras (1967), a Baixada Santista (1956), a cidade do Rio de Janeiro (1966 e 1967), a Serra de Maranguape (1974), o Sul de Minas Gerais (1948), o vale do rio Tubarão, em Santa Catarina (1974).

Os eventos catastróficos registrados no Brasil, nas últimas décadas, guardam características peculiares. Em Santos-SP (1956), os escorregamentos de terra nos morros foram ocasionados basicamente pelas condições geológicas e pela ação antrópica, efetivados pelas chuvas intensas e prolongadas. O ocorrido na região de Tubarão-SC (1974) teve como agente desencadeador as pesadas precipitações, 742 mm em 16 dias de chuvas, dos quais 251,7 mm caíram em 24 horas (25.03.1974), desmoronamentos e enchentes danificaram uma grande extensão de terras. Situação semelhante aconteceu na Serra das Araras e em Caraguatatuba-SP (1967) com movimentos de massa em forma de desmoronamentos, em que os índices pluviométricos atingiram 420 mm em 18 de março de 1967. (BIGARELLA *et al.* 2003, p. 1061-1062).

Os eventos verificados no Rio de Janeiro em 1967 estão associados de acordo com Meis e Silva¹⁴ (1968) *apud* Bigarella *et al.* (2003, p. 1067) ao impulso climático excepcional e à interação entre fatores tais como, estrutura geológica, formas topográficas e as modificações introduzidas pelo homem.

Pellerin¹⁵ *et al.* (1997) *apud* Bigarella *et al.* (2003, p. 1068) caracterizaram os acidentes catastróficos nas vertentes da Serra Geral, no sul de Santa Catarina, em dezembro de 2005, como corrida de lama, evento ocasionado em função das altas precipitações havidas nas vertentes íngremes. Nessa situação, após duas ou três horas do início das chuvas originou-se um fluxo concentrado que destruiu tudo a sua passagem, transportando troncos, blocos e matacões rochosos englobados numa massa de detritos finos.

Episódios extremos mais recentes, que provocaram grandes prejuízos à sociedade brasileira, ainda carecem de referencial técnico científico, entre esses destacam-se: os ocorridos no Vale do Itajaí, Estado de Santa Catarina, mês de novembro de 2008, com 135 óbitos e 2 desaparecidos¹⁶; em dezembro de 2009, no município de Angra dos Reis, resultando em 53 mortes¹⁷; na região serrana do Rio de Janeiro, no mês de janeiro de 2011, o mais catastrófico, episódio que atingiu as cidades de Petrópolis, Teresópolis, Nova Friburgo, Sumidouro e São José do Vale do Rio Preto (FIGURA 6), deixando marcas profundas de alteração da paisagem, de destruição da infraestrutura local e das atividades econômicas, contabilizando mais de 900 mortes e cerca de 400 desaparecidos¹⁸; além do ocorrido no litoral paranaense, que pode ser comparado com os descritos anteriormente, não em número de vítimas fatais, mas pela sua amplitude.

¹⁴ MEIS, M. R. M. & SILVA, J. X. – 1968 – **Considerações geomorfológicas a propósito dos movimentos de massa ocorridos no rio de Janeiro**. Rev. Bras. Geogr, 30:55-73.

¹⁵ PELLERIN, J.; DUARTE, G. M., SCHEIBE, L. F.; MENDONÇA, M.; BUSS, M. D.; & MONTEIRO, M. A. – 1997 **Geosul**, UFSC. 12(23):71-82, Florianópolis.

¹⁶ Dados divulgados pela Defesa Civil do Estado de Santa Catarina. Disponível em: <http://www.desastre.sc.gov.br>.

¹⁷ Dados divulgados pela Defesa Civil de Angra dos Reis – RJ. Disponível em: <http://www.defesacivil.angra.rj.gov.br/asp/tragedia.asp>.

¹⁸ Dados divulgados pela Defesa Civil do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.defesacivil.rj.gov.br>.

Neste último desastre “foram registrados 3 mortes, 221 pessoas feridas, mais de 2000 desabrigados e centenas de casas destruídas, com prejuízos da ordem de 104 milhões de reais.” (PARANÁ, 2011).



FIGURA 6 - Foto ilustrando movimentos de massa ocorridos na Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011, município de Teresópolis, maior desastre natural registrado no Brasil. FONTE: <http://www.matutando.com/wp-content/uploads/2011/01/enchente0001.jpg>

Os processos mais recentes citados foram amplamente divulgados pela mídia nacional. A divulgação dos movimentos de massa está atrelada a sua localização e impacto direto a sociedade, uma vez que o interesse da imprensa está relacionado aos episódios ocorridos em áreas ocupadas.

2.4 TERMINOLOGIA ASSOCIADA A ANÁLISES QUE ENVOLVEM MOVIMENTOS DE MASSA ENQUANTO DESASTRES NATURAIS

Embora a presente proposição seja o desenvolvimento de uma metodologia para elaborar o mapeamento de suscetibilidade aos movimentos de massa, considerações a respeito das principais terminologias empregadas aos processos em questão enquanto episódios que resultam em impactos ambientais negativos tornam-se

pertinentes, no sentido de evitar atribuições equivocadas e por vezes divergentes. Por este motivo, se fazem necessárias reflexões sobre alguns dos principais conceitos envolvidos.

Iniciando com **perigo**, Rocha (2005, p. 18) afirma que este “gera uma situação com o potencial de ameaçar a vida humana, a saúde, propriedade ou ambiente.” Zêzere (2005, p. 81) classifica o perigo ou perigosidade como a “probabilidade de ocorrência de um fenômeno potencialmente destruidor, num determinado período de tempo e numa dada área.” Zêzere e Garcia (2003, p. 300) consideram que este conceito “leva em conta uma probabilidade espacial e temporal, ou apenas temporal.”

Para **suscetibilidade**, Zêzere *et al.* (2004) definem como “possibilidade espacial de ocorrência de um determinado fenômeno numa dada área com base em fatores condicionantes do terreno, independentemente do seu período de recorrência.” A suscetibilidade é “indicadora da potencialidade de ocorrência de processos naturais e induzidos em uma dada área, expressando-se segundo classes de probabilidade de ocorrência.” (CARVALHO *et al.*, 2007, p. 28).

Em linhas gerais, a suscetibilidade está associada à possibilidade de ocorrência do fenômeno com ou sem a interferência antrópica, podendo causar ou não consequências indesejadas ao próprio homem, de acordo com as condições de determinado ambiente, sem contemplar a variável tempo, que é considerada pela perigosidade.

Especificamente referindo-se aos movimentos de massa, Zêzere (2007, p. 17) associa o conceito de suscetibilidade a “propensão do território à ocorrência de um tipo particular de movimento de massa, com base nos fatores condicionantes da instabilidade.”

O termo **vulnerabilidade** é definido por Rocha (2005, p. 18) como “o grau de fragilidade dos elementos (receptores) de uma comunidade.” Palácios *et al.* (2005) afirmam que o termo se refere a um conjunto de condições ambientais, sociais, econômicas, políticas e educacionais que deixa a comunidade mais ou menos exposta a um desastre, seja pelas condições de insegurança existentes ou pela capacidade de resposta e recuperação ao desastre.

Segundo Castro (2001)¹⁹ *apud* Rocha (2005, p. 17):

A vulnerabilidade define a probabilidade de que uma comunidade exposta ao impacto de uma ameaça natural possa sofrer danos, segundo o grau de fragilidade de seus elementos (infraestrutura, construções, atividades produtivas). Esses danos podem ser representados pelo impacto sobre o desenvolvimento, economia e sobre os meios que criam e melhoram a qualidade de vida.

Diante dos pressupostos descritos, presume-se que a combinação entre suscetibilidade e/ou perigo e vulnerabilidade resulta em algum tipo de perda. Isto é, a condição de predisposição aos eventos danosos correlacionados ao nível de vulnerabilidade reflete em **risco**.

Rocha (2005, p. 16) define risco como “a combinação da frequência (número de ocorrências de um acidente por unidade de tempo) com a consequência (impacto de um acidente nas pessoas, no ambiente e na propriedade) de eventos indesejáveis, envolvendo algum tipo de perda.”

Se alguma coisa pode correr mal e criar problemas ao homem ou às suas realizações, fala-se de risco. Há consciência de que o risco pode ser maior ou menor em função da importância de um determinado acontecimento e da presença do homem. Se o homem não estiver presente, considera-se, com frequência, que não é legítimo falar em risco. É que, para haver risco, diz-se, é preciso que haja vulnerabilidade. (REBELO, 2010, p. 32).

“A relação entre a possibilidade de ocorrência de um dado processo ou fenômeno, e a magnitude de danos ou consequências sociais e/ou econômicas sobre um dado elemento, grupo ou comunidade se refere ao risco.” (CARVALHO *et al.*, 2007, p. 26).

Sánchez (2008, p. 320) afirma que “o risco pode ser definido de modo mais formal como o produto da probabilidade de ocorrência de um determinado evento pela magnitude das consequências, ou $R = P \times C$.”

Existem várias classificações e diversos tipos de riscos. Segundo Xavier da Silva (2001, p. 175) “o conceito de risco ambiental é, essencialmente, uma ligação da ocupação humana com as possibilidades de ocorrência de eventos que lhe sejam

¹⁹ CASTRO, S. M.; **Estratégias, Políticas e Práticas para Reduzir o Risco de Perigos Naturais e a Vulnerabilidade**. Disaster Preparedness Management, San Jose, Costa Rica: 2001.

danosos.” Cerri e Amaral (1998) consideram os riscos ambientais como a classe maior e subdivide-os conforme FIGURA 7.

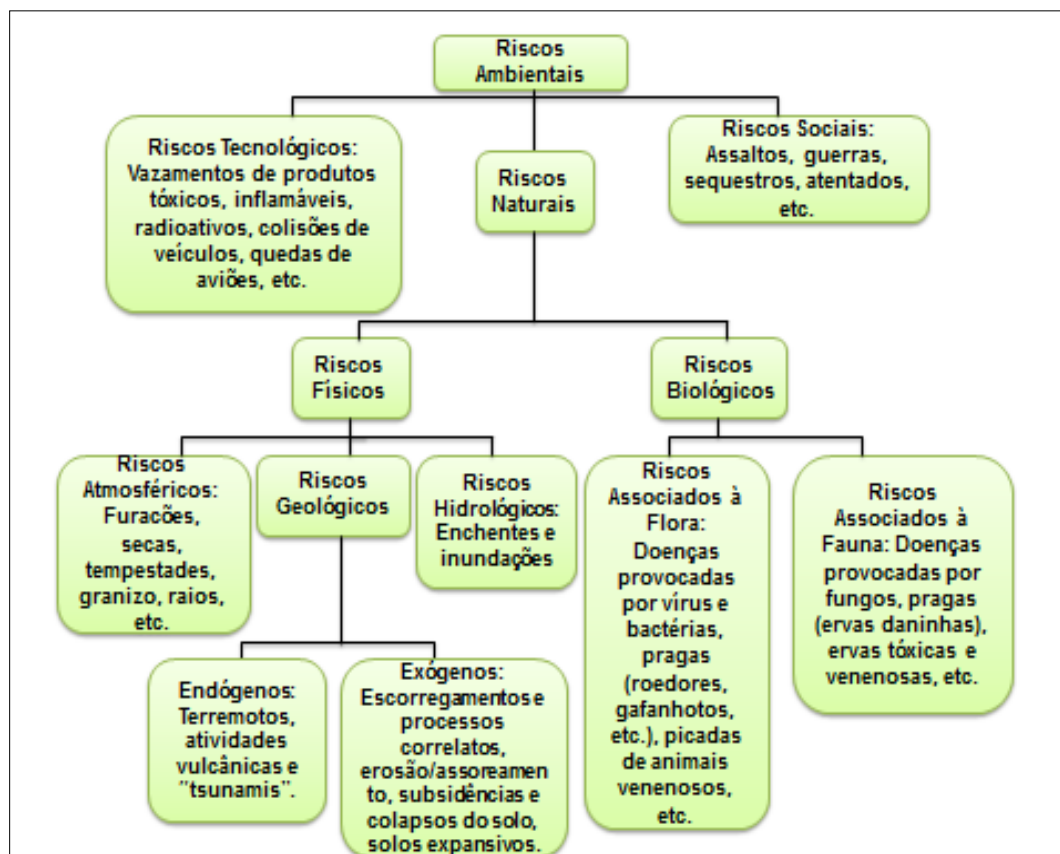


FIGURA 7 - Fluxograma com classificação dos Riscos Ambientais. FONTE: Cerri e Amaral (1998).

Seguindo a classificação proposta, os movimentos de massa se enquadram entre os riscos geológicos exógenos. Especificamente sobre essa tipologia, o IPT (1991, p. 73) considera “o risco a possibilidade de perigo, perda ou dano, do ponto de vista social e econômico, a que a população esteja submetida caso ocorram escorregamentos e processos correlatos.”

A pesquisa atual apoia-se nos conceitos descritos e como o objetivo é gerar um modelo de suscetibilidade considera este termo como a possibilidade de ocorrência do fenômeno em um determinado local, de acordo com suas condições naturais, com ou sem consequências danosas, enquadrando-se na terminologia adotada pelo Banco Mundial, o qual define a suscetibilidade como “o grau de predisposição que tem uma

área a ser gerada uma ameaça devido as suas condições intrínsecas: inclinação, geologia, tipos de solo e cobertura vegetal.” (TORO *et al.*, 2013, p. 11).

Os conceitos apresentados demonstram complementariedade entre si, sendo possível aferir, por exemplo, que não existe risco sem suscetibilidade, entretanto, áreas desocupadas podem apresentar elevada suscetibilidade, porém, sem prejuízos ao homem ou suas atividades, não haverá risco. Neste sentido, é coerente afirmar, que estudos voltados à identificação de risco, necessariamente passam, em primeira instância, pela modelagem e análise de suscetibilidade, objeto desse estudo.

2.5 BACIA HIDROGRÁFICA COMO SISTEMA

Renomados autores dedicaram-se aos estudos envolvendo as bacias hidrográficas e conseqüentemente à sua conceituação e utilização como unidade de área de análise, com destaque para Christofolletti (1974); Guerra e Cunha (1996 e 2000); Rodrigues e Adami (2005); Botelho (1999 e 2004); entre outros, sendo que as semelhanças na conceituação predominam. Nessa pesquisa, a bacia hidrográfica “é considerada uma área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e materiais para uma saída comum num determinado ponto do canal fluvial.” (COELHO NETTO, 1998, p. 97-98).

A utilização da bacia hidrográfica como unidade de área de estudo justifica-se em função das inter-relações estabelecidas entre seus elementos constituintes: as vertentes, os rios, a energia e matéria que a compõem, possibilitando análises sob a perspectiva da integração e totalidade desses elementos, representando, portanto, uma visão holística desse fragmento da paisagem. Botelho (1999, p. 269) “considera a bacia hidrográfica uma unidade natural de análise da superfície terrestre, onde é possível reconhecer e estudar as inter-relações existentes entre os diversos elementos da paisagem e os processos que atuam em sua esculturação.”

Nas últimas décadas, muitos estudos voltados à análise da paisagem utilizaram-se das delimitações de bacias hidrográficas, isso se deve, entre outros motivos, por serem reconhecidas mundialmente como unidades estratégicas para o planejamento de uso e ocupação da terra.

Os elementos constituintes da bacia hidrográfica podem ser abordados em sua interação, sob a perspectiva de um sistema aberto, “no qual ocorre constante troca de energia e matéria, tanto recebendo como perdendo.” (CHRISTOFOLETTI, 1980, p. 03).

A bacia de drenagem, enquanto uma unidade hidrogeomorfológica, constitui um exemplo típico de sistema aberto na medida em que recebe impulsos energéticos das forças climáticas atuantes sobre sua área e das forças tectônicas subjacentes, e perde energia por meio da água, dos sedimentos e dos solúveis exportados pela bacia no seu ponto de saída. (CHORLEY²⁰ 1962 *apud* COELHO NETO, 1998, p. 98).

De acordo com Botelho e Silva (2004, p. 153):

Ao distinguirmos o estado dos elementos que compõem o sistema (solo, água, ar, vegetação etc.) e os processos a eles relacionados (infiltração, escoamento, erosão, assoreamento, inundação, contaminação etc.) somos capazes de avaliar o equilíbrio do sistema ou ainda a qualidade ambiental nele existente.

As vertentes estão inter-relacionadas com os outros componentes da bacia e uma vez ocorrendo alterações nas vertentes, em decorrência, por exemplo, de movimentos de massa, a interferência ocorrerá nos demais elementos, incluindo o volume de materiais que serão deslocados para fora da bacia.

Guerra e Cunha (2000, p. 353) salientam que:

Sob o ponto de vista do auto-ajuste pode-se deduzir que as bacias hidrográficas integram uma visão conjunta do comportamento das condições naturais e das atividades humanas nelas desenvolvidas uma vez que, mudanças significativas em qualquer dessas unidades, podem gerar alterações, efeitos e/ou impactos a jusante e nos fluxos energéticos de saída (descarga, cargas sólidas e dissolvida).

Partindo dos pressupostos descritos, a indicação de suscetibilidade aos movimentos de massa, tendo como unidade de área uma bacia hidrográfica é favorável, pois ela permite a melhor compreensão das mudanças físicas que ocorrem no ambiente, produzidas por processos naturais, antrópicos ou ambos. Destaca-se ainda que, as atividades antrópicas interferem diretamente nesses processos e tem nessa unidade da paisagem, seu palco de ações.

²⁰ CHORLEY R. J. Geomorphology and the general systems theory U.S. Geol. Survey Prof. Paper, 500-B: 10p. 1962.

2.5.1 Subsistema vertente

Como descrito anteriormente, a vertente é um elemento constituinte das bacias hidrográficas e, portanto, em conjunto com os demais atuam na dinâmica de formação e evolução dela própria, assim como do relevo como um todo. Christofolletti (1980, p. 59) afirma que “as vertentes constituem partes integrantes e não podem ser descritas de modo integral sem que se façam considerações a propósito das relações entre elas e a rede hidrográfica.”

Sob esse ponto de vista, é relevante o entendimento das correlações existentes entre os diversos componentes que atuam nesse processo evolutivo, auxiliando na compreensão das transformações que compõem a paisagem como um todo.

De acordo com Florenzano (2008, p. 16) “as vertentes, também denominadas encostas, são superfícies inclinadas que formam a conexão dinâmica entre a linha divisória de águas e o fundo do vale”. Dylik²¹ (1968) *apud* Christofolletti (1980, p. 26) reporta-se a vertente como uma “forma tridimensional que foi modelada pelos processos de denudação, atuantes no presente ou no passado, e representando a conexão dinâmica entre o interflúvio e o fundo do vale.”

Bigarella *et al.* (2003, p. 972) afirmam que “as vertentes abrangem a maior parte da paisagem, fornecendo água e sedimentos para os cursos de água que drenam as bacias hidrográficas. Seu conceito define a superfície propriamente dita, bem como sua declividade.” Para Casseti (2005, p. 04):

A vertente se caracteriza como a mais básica de todas as formas de relevo, razão pela qual assume importância fundamental para os geógrafos físicos. Essa importância pode ser justificada sob dois ângulos de abordagem: um, por permitir o entendimento do processo evolutivo do relevo em diferentes circunstâncias, o que leva à possibilidade de reconstituição do modelado como um todo e outro por sintetizar as diferentes formas do relevo tratadas pela geomorfologia, encontrando-se diretamente alterada pelo homem e suas atividades. Uma vertente contém subsídios importantes para a compreensão dos mecanismos morfogenéticos responsáveis pela elaboração do relevo na escala de tempo geológico (propriedades geoecológicas), permitindo entender as mudanças processuais recentes (processos morfodinâmicos), na escala de tempo histórico, se individualizando como palco de transformações sóciorreprodutoras.

²¹ DYLIK, J. – 1968 – Notion du versant en geomorphologie. Bulletin de l' Academie Polonaise des Sciences. Series des Sciences Geologiques et Geographiques. 16;2, p. 125-132.

fisionomias do relevo diversificadas, desde superfícies planas com suaves declives até superfícies irregulares e com elevada inclinação. Conforme Penteado (1974, p. 102) “as encostas apresentam os seguintes perfis: convexos do topo à base; superior convexo e inferior côncavo, e os perfis complexos, com um segmento reto entre segmentos curvos superior e inferior.” De acordo com Bigarella *et al.* (2003, p. 973):

A maior parte das encostas é composta de vários segmentos, geralmente seu perfil é formado de um segmento superior convexo, no qual a declividade aumenta para a jusante, seguido por um segmento inferior côncavo com redução de declividade encosta abaixo. Entre eles pode-se encontrar ou não, um segmento retilíneo, cuja declividade é aproximadamente constante (FIGURA 9).

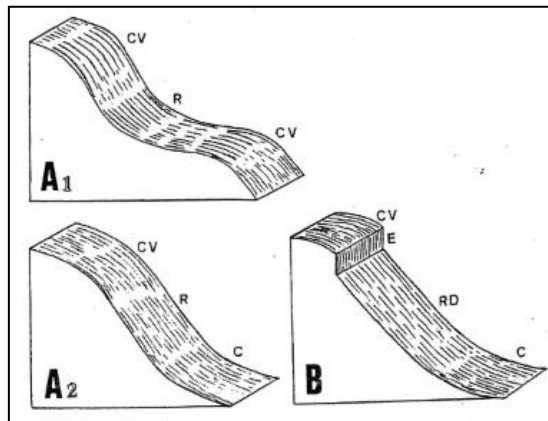


FIGURA 9 - Designação dos vários segmentos da vertente. A1 – vertente convexo-(retilíneo)-côncavo-convexo; A2 – vertente convexo-côncavo; B – vertente formada pelo recuo da escarpa. C = côncavo, CV = convexo-côncavo; E = escarpa (face-livre); R = retilíneo; RD = retilíneo (vertente de detritos). FONTE: Bigarella *et al.* (2003, p. 973).

Ainda neste contexto, Valeriano *et al.* (2009) e Palhares (2011) classificam as curvaturas verticais em **côncavas**: quando o afastamento entre as curvas de nível aumenta conforme as altitudes diminuem (curvatura negativa). **Retilíneas**: quando há igual afastamento entre as curvas de nível e **Convexas**: quando o afastamento entre as curvas diminuem conforme as altitudes aumentam (curvatura positiva). Quando as curvaturas horizontais a classificação é conforme o direcionamento de fluxo hídrico em: **Convergentes, Planas e Divergentes** (FIGURA 10).

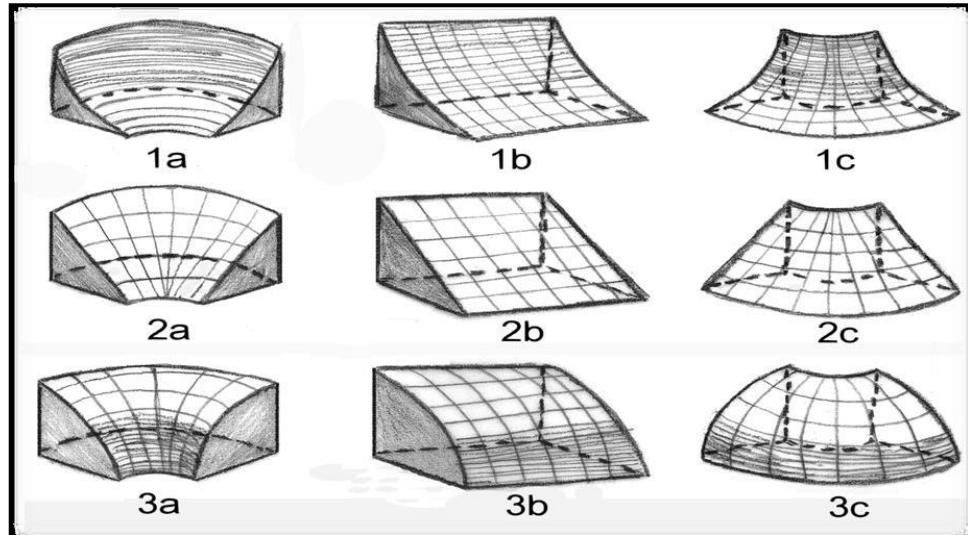


FIGURA 10 - Combinações de curvaturas verticais e horizontais para caracterização das vertentes. 1a) côncava-convergente; 1b) côncava-planar; 1c) côncava-divergente; 2a) retilínea-convergente; 2b) retilínea-planar; 2c) retilínea-divergente; 3a) convexa-convergente; 3b) convexa-planar; 3c) convexa-divergente. FONTE: Valeriano *et al.* (2009) adaptado por Palhares (2011).

Christofolletti (1980, p. 39) apresenta a seguinte conceituação para os principais termos utilizados na abordagem das vertentes:

- Unidade de vertente: consiste em um segmento ou em um elemento;
- Segmento: é uma porção do perfil da vertente no qual os ângulos permanecem aproximadamente constantes, o que lhe dá o caráter retilíneo;
- Elemento: é a porção da vertente na qual a curvatura permanece aproximadamente constante. Pode ser dividido em elemento convexo, com curvatura positiva, quando os ângulos aumentarem continuamente para baixo, e em elemento côncavo, com curvatura negativa, quando os ângulos decrescem continuamente para baixo;
- Convexidade: consiste no conjunto de todas as partes de um perfil de vertente no qual não há diminuição dos ângulos em direção a jusante;
- Concavidade: consiste no conjunto de todas as partes de um perfil de vertente no qual não há aumento dos ângulos em direção à jusante.

Na conexão estabelecida entre os elementos constituintes das vertentes se desenvolvem processos que atuam como agentes fundamentais envolvendo princípios geotécnicos de estabilidade e instabilidade, sendo tratados a seguir alguns conceitos fundamentais:

✓ **Princípios básicos da dinâmica de vertentes naturais:** caracterizada pela alta complexidade de seu funcionamento, o processo de desenvolvimento das vertentes é compreendido por Christofolletti (1980) sob a ótica de dois conceitos, de **balanço**

morfogenético e a dinâmica das vertentes como **sistema aberto**. O primeiro indica, que a meteorização e a pedogênese correspondem às componentes verticais na vertente, em que a ação combinada dessas componentes tem o efeito de aumentar a espessura do regolito, considera que os demais processos morfogenéticos (movimentos do regolito) correspondem às componentes paralelas, tais processos tem o efeito de retirar os detritos da vertente, promovendo a diminuição da espessura do regolito e o rebaixamento do modelado. O segundo, ao classificar a vertente como sistema aberto, em que recebe e perde tanto matéria como energia, considera como fontes primárias a precipitação, a rocha subjacente e a vegetação, enquanto que as fontes originais de energia são constituídas pela gravidade e radiação solar. Portanto, os processos que se verificam nas vertentes (escoamento, meteorização, movimentos do regolito, infiltração, eluviação e outros) fazem com que haja fluxo de matéria e energia através do sistema, que acaba sendo transferido para o sistema fluvial.

Quanto ao balanço morfogenético Casseti (1991, p. 67) afirma que “como regra geral, tem-se que quanto maior o declive ou gradiente da vertente, mais o componente paralelo se intensifica, o que responde pelo enfraquecimento do componente perpendicular.” Essa situação é observada comumente, enquanto solos rasos predominam nas vertentes com grandes declives, ao contrário, em áreas mais planas, os solos são mais espessos.

✓ **Considerações geotécnicas:** As características das rochas e solos estão diretamente relacionadas ao processo de intemperismo, transporte e deposição de material e conseqüentemente na formação e alteração das vertentes. As camadas rochosas, por exemplo, são submetidas ao processo de meteorização de forma diferenciada de acordo com condições climáticas. Em áreas onde prevalecem elevados índices pluviométricos, como em climas tropicais e subtropicais, predomina a meteorização química das camadas rochosas, enquanto que em condições de aridez, prevalece a meteorização por meio da ação mecânica, esses processos implicam na evolução das vertentes de forma distinta. Por outro lado, condições geomorfológicas e geológicas incidem como fatores que eventualmente interferem na estabilidade das vertentes. Casseti (1991, p. 68) considera que:

Além do fator declividade, o comprimento de rampa e a forma geométrica da vertente, como intensificadores dos processos morfogenéticos ou diferenciadores da intensidade do fluxo por terra. A natureza da rocha, além de responder pelo comportamento da formação superficial, intervém ainda no perfil da vertente, no seu declive médio e na velocidade de seu recuo ou evolução. Quanto à formação superficial, deve-se destacar a característica textural definida pelos minerais resultantes, que respondem pela especificidade de determinados processos morfogenéticos (grau de plasticidade). Por exemplo, a participação da argila favorece a solifluxão, o “*creeping*” ou reptação e ainda o deslizamento de massas.

✓ **Conceito de estabilidade:** Conforme Bigarella *et al.* (2003, p. 1010) “a estabilidade de uma vertente diminui quando a resistência ao cisalhamento decresce. O aumento da pressão hidrostática nas vertentes é um mecanismo natural que reduz consideravelmente a resistência ao cisalhamento.” Eventos chuvosos podem resultar na ruptura de massa constituída de solo, rocha ou material composto interferindo, portanto, na estabilidade da encosta.

Bigarella (*op. cit.*) destacam ainda que:

Quando a água percola livremente, o aumento da pressão hidrostática é mínimo. Entretanto, quando a água é impedida de se movimentar, por exemplo, por uma camada de rocha impermeável, a água acumula-se aumentando a pressão hidrostática, e conseqüentemente diminuindo a resistência ao cisalhamento. Nas partes inferiores da vertente é possível mesmo a existência de pressões hidrostáticas semelhantes às condições artesianas. Essas pressões excepcionalmente altas são possíveis porque a zona de alta permeabilidade (transição solo/rocha) está confinada por camadas de baixa permeabilidade (rocha intacta e horizontes inferiores do solo).

Penteado (1974, p. 103) reporta-se a Jahn²² (1968) ao propor um critério de análise de equilíbrio das vertentes. O autor divide os processos de formação das encostas em dois grupos: processos de intemperismo e processos de desgaste. Os primeiros agindo verticalmente e os segundos paralelamente às vertentes. O equilíbrio ocorre numa condição na qual a cobertura do regolito permanece intocada em espessura com o tempo. Esse balanço depende da relação entre a componente vertical e a componente paralela que atuam na evolução das encostas.

²² JAHN, A. – “**Denudational balance of slopes**” – Geogr. Polonica, 1968.

Em síntese, o equilíbrio da vertente ocorre quando a formação do solo por meio do intemperismo equivale com a subtração de material pelo excesso transportado processos erosivos.

A importância dos aspectos geológicos enquanto componentes diretamente atuantes no equilíbrio das vertentes é ressaltada por Bigarella *et al.* (2003, p. 1012) ao afirmarem que:

As discontinuidades desempenham papel importante na ruptura e no desmoronamento das vertentes. Enquanto muitas vertentes são estáveis em condições íngremes e em elevadas altitudes, outras não são nem mesmo quando possuem pequenos declives e pouca altura. Essa diferença deve-se ao fato de que a estabilidade da vertente varia conforme a inclinação das superfícies de discontinuidades dentro do maciço.

Em se tratando especificamente dos movimentos de massa, Florenzano (2008, p. 165) considera que “quando a tensão de cisalhamento ultrapassa a resistência dos materiais ou esta última diminui, os materiais perdem sua estabilidade e ocorrem tais processos.”

Outro componente envolvido diretamente na condição de equilíbrio das encostas é a cobertura vegetal, uma vez que, interfere tanto no processo de pedogênese, quanto no deslocamento de materiais, nesse último funcionando como obstáculo para o transporte de sedimentos e detritos. Casseti (1991, p. 75) descreve os tipos principais de interferência da vegetação na formação da vertente, “os aspectos mecânicos e aqueles referentes ao balanço hídrico além do efeito da cobertura vegetal como frenador, que é dissipador da energia do material em deslocamento.”

2.5.1.1 Subsistema canal fluvial

Assim como as vertentes, os canais fluviais são elementos interdependentes que compõem o sistema bacia hidrográfica, executam o escoamento das águas e sedimentos provenientes das encostas. Penck²³ (1924) *apud* Casseti (1991, p. 72) reconhece que:

²³ PENCK, A. **Morphologie der Erdoberfläche**. Stuttgart, Engelhorn (2v), 1984.

Existe uma direta relação ou interdependência entre a vertente e o curso d'água. Portanto, ao mesmo tempo em que a vertente evolui em função da disposição do talvegue (nível e base para a intensificação dos processos morfogenéticos), esta, em decorrência das derivações apresentadas, implica diretamente o comportamento do canal.

Para Christofolletti (1980, p. 60):

É impossível considerar as vertentes e os rios como entidades separadas porque, como membros de um sistema aberto que é a bacia hidrográfica estão continuamente em interação. A forma e o ângulo das vertentes deverão estar ajustados para fornecer a quantidade de detritos que o curso de água pode transportar. Inversamente, os parâmetros hidráulicos dos cursos de água deverão estar ajustados para transportar a quantidade de material fornecida pelas vertentes. Quando o sistema vertente-curso de água está em equilíbrio, então toda a bacia hidrográfica pode ser considerada como em estado de ajustamento.

Guerra e Cunha (2000, p. 361) destacam que “a dinâmica inter-relação que existe entre as encostas e os vales fluviais, incluindo a calha do rio, permite constantes trocas de causa e efeito entre os elementos da bacia hidrográfica.” Desse modo, é possível prever que alterações nas encostas, como processos erosivos naturais ou desmatamento causado pela ação antrópica poderão provocar alterações na dinâmica fluvial.

O conhecimento das características fluviais é importante para o desenvolvimento de projetos voltados ao controle de erosão, conservação de recursos hídricos, implementação de políticas de planejamento ambiental, entre outros. Um dos processos que possibilita maior conhecimento da bacia de drenagem, para múltiplas finalidades, é denominado de hierarquia fluvial, que consiste na classificação dos cursos d'água dentro de uma determinada bacia. “Esse processo tem a função de facilitar e tornar mais objetivo os estudos morfométricos (análise linear, areal e hipsométrica) sobre as bacias hidrográficas.” (CHRISTOFOLETTI 1980, p. 106).

Muitos pesquisadores desenvolveram metodologias de hierarquização dos rios, entre eles destacam-se Robert E. Horton (1945) e Arthur N. Strahler²⁴ (1952), este último tendo introduzido uma forma simplificada e didática de hierarquização em que:

²⁴ STRAHLER, A. N. **Dynamic basis of geomorphology**. Bul. Geol. Society of Amer., Washington, D. C., 63(9): 923-938, 1952.

Os menores canais, sem tributários, são considerados como de primeira ordem, estendendo-se desde a nascente até a confluência; os canais de segunda ordem surgem da confluência de dois canais de primeira ordem, e só recebem afluentes de primeira ordem, podendo receber afluentes de segunda e de primeira ordens; os canais de quarta ordem surgem da confluência de dois canais de terceira ordem, podendo receber tributário das ordens inferiores. E assim sucessivamente. (CHRISTOFOLETTI *op. cit.* p.106).

Para o entendimento da dinâmica do canal de drenagem, outros aspectos devem ser analisados. Neste contexto, Bigarella *et al.* (2003, p. 1277-1278) consideram que:

A turbulência e a velocidade relacionam-se com o trabalho que o rio executa, isto é, erosão, transporte e deposição dos sedimentos detríticos. Para analisar-se a importância do trabalho fluvial deve-se considerar a energia do rio, tanto na sua forma potencial como cinética. O fluxo das águas transforma a energia potencial em cinética deduzidas as perdas para vencer as forças resistentes ao movimento (fricção)... A capacidade de erosão de um rio depende, principalmente, das partículas por ele transportadas, do que do volume de água. A ação corrosiva tende a eliminar a rugosidade do fundo. O fluxo da maioria dos rios aumenta para a jusante, assim como a sua carga. Esta aumenta de tal sorte, de modo a não haver um incremento na capacidade erosiva. Se por qualquer razão o fluxo diminuir ocorrerá deposição.

A capacidade de vazão, transporte e deposição de detritos do rio depende, dentre outras condições, das características das vertentes, em contrapartida as vertentes são influenciadas pela atuação do canal fluvial, refletindo em sua evolução e modelagem.

O rio, como importante agente de erosão e sedimentação, molda o vale no qual está inserido, de acordo com sua capacidade de vazão e transporte, controlados por elementos como o clima, a litologia, o relevo e a cobertura vegetal. A dinâmica das águas correntes está determinada por um conjunto de variáveis como a descarga fluvial, a velocidade da vazão, a carga de sedimentos, o gradiente do rio e o nível de base, que por sua vez influenciam no processo de deslocamento e deposição de detritos, modelando a encosta em sua geometria, na forma do vale (V, U, assimétrico, achatado), na formação de depósitos aluviais, entre outros.

Portanto, o canal também passa a ser um agente envolvido nos processos ocorridos nas encostas, incluindo os movimentos de massa e conforme sua dinâmica potencializa ou não o arraste de materiais. Os diferentes padrões de canais atuam de

forma distinta nesse sistema, esses são “geralmente descritos como retilíneos, anastomosados e meandantes.” (LEOPOLD; WOLMAN; MILLER, 1964; ALLEN, 1965²⁵ *apud* BIGARELLA *et al.*, 2003, p. 1274).

Próximos às nascentes, nas cabeceiras, com forte gradiente do leito e topografia íngreme, a velocidade do rio atinge o máximo, a carga sólida transportada é elevada, resultado do intenso processo de erosão, em consequência ocorre à modelagem do vale em V, profundo com vertentes fortemente inclinadas, nesse fragmento a energia de desgaste e transporte do canal fluvial é relativamente alta. Em nível de gradiente do rio e topografia intermediária, a velocidade diminui, a carga sólida que sofre deposição é elevada, a planície de inundação torna-se presente, o fundo do vale é chato, profundo, com vertentes inclinadas e concavidade na base, normalmente com canal anastomosado. Com gradiente e topografia suave, a velocidade do rio é mínima, a carga de deposição de sedimentos finos é grande, a planície de inundação ampla, o vale tem fundo chato com canal meandrante. (GUERRA; CUNHA, 1994; CRHISTOFOLETTI, 1980).

Ressalta-se que a carga sólida transportada pode ser via saltação, rolamento ou suspensão, conforme sua composição das partículas (estrutura, tamanho, peso, forma, etc.) que serão depositadas de acordo com a relação entre essas características e a energia do canal fluvial, resultando na disposição diferenciada de detritos desde a nascente até a foz do rio. “Nas planícies de inundação depositam-se geralmente camadas de areia fina, silte e argila. No leito de muitos rios de terrenos acidentados encontram-se depósitos rudácios constituídos por seixos, blocos e até matacões.” (BIGARELLA *et al.*, 2003, p. 1313-1314).

Suguio e Bigarella (1990, p. 92-93) enfatizam que:

O material mais grosseiro não constitui propriamente a carga do rio. Ele aí encontra-se devido a processos de movimento de massa que transportou o manto de intemperismo para o fundo do vale. A ação fluvial eliminou os detritos finos do manto coluvial, deixando no leito do rio um depósito residual extremamente grosseiro, dificilmente transportável mesmo nas maiores enxurradas. Entretanto, este material pode ser transportado facilmente pelas

²⁵ LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G. & MILLER, J. P. – 1964 – **Fluvial processes in geomorphology**. San Francisco: W. H. Freeman and Company. 522p.
ALLEN, J. R. I. – 1965 – **The sedimentation and paleogeography of the Old Red Sandstone of Anglesey, north Wales**. Yorkshire Geol. Soc. Proc. 35:139-185.

torrentes de lama. Apenas o material rudáceo mais fino é passível de transporte regular.

Sob a perspectiva sistêmica, em que os elementos pertencentes à bacia hidrográfica estão inseridos, a análise do rio, assim como da vertente, contribui para a compreensão tanto da atuação dos condicionantes de instabilidade das encostas, quanto no reconhecimento e análise de movimentos de massa, uma vez que, neste ambiente, tais elementos estão a priori, harmoniosamente correlacionados e estabilizados, conduzidos por fluxos de materiais e energia, porém, mudanças impostas num componente por estímulos externos, refletem diretamente nele mesmo e indiretamente nos demais, podendo provocar desequilíbrio.

2.6 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG's) APLICADOS AOS ESTUDOS DE MOVIMENTOS DE MASSA

Reconhecendo que os estudos relacionados à compressão do rompimento do equilíbrio das encostas, com ou sem a interferência humana, tem elevado nível de complexidade, a presente pesquisa tem como suporte, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) que possuem ferramentas necessárias para a geração de cenários preditivos, representados por meio de mapeamentos, determinando a distribuição espacial das áreas suscetíveis aos movimentos de massa a partir de uma modelagem digital.

Em análises da paisagem, os SIG's apresentam um amplo ferramental à manipulação de dados espaciais, em casos de grandes volumes e complexidade, para geração de informações que subsidiam a avaliação e tomada de decisão, a exemplo do objetivo ora proposto.

Blaschke e Lang (2009, p. 42) afirmam que “com a ajuda de um SIG é possível explicar e visualizar relações espaciais, representá-las e apresentá-las em forma de mapas. É possível também desenvolver cenários espaciais e avaliar intervenções.”

Nos últimos anos, análises ambientais realizadas com a utilização dos SIG's têm aumentado consideravelmente. De acordo com Almeida (2007, p. 20) “com os avanços em computação gráfica e a progressiva inserção de interfaces gráficas no

universo digital no final dos anos 1980 os SIG's entraram definitivamente em cena no âmbito de estudos ambientais.”

Rocha (2005, p.48) considera que:

A leitura, interpretação e cruzamento de uma grande quantidade de informações disponíveis em mapas temáticos como: geologia, solos, relevo, altimetria, declividade, vegetação entre outros, só se torna efetiva e confiável, quando se dispõe de ferramentas poderosas para armazenamento, manipulação, e interpretação desses dados. Isso tem sido feito eficientemente com uso dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's).

Câmara *et al.* (2001, p. 1) afirmam que “as ferramentas computacionais chamadas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar banco de dados georreferenciados.”

Os SIG's possibilitam o uso de modelos que representam o mundo real, contribuindo assim para a compreensão de objetos reais por meio de simulações. Entretanto, existem riscos de perda da eficiência dos resultados se houver interpretações errôneas de modelagens espaciais. Segundo Refosco (2007 p. 329):

O emprego de modelos, especialmente os espaciais dinâmicos, para a análise ambiental e a análise regional visando o planejamento ganha importância. Isso ocorre tanto em função das informações geradas pelo modelo que permitem a análise dos processos em andamento em termos qualitativos e quantitativos, quanto em função da possibilidade de gerar cenários futuros para variáveis socioeconômicas, naturais ou de outras naturezas. A modelagem é um instrumento para a simulação de processos e fenômenos e permite análises sobre o uso da terra.

Especificamente sobre o uso dos SIG's em pesquisas relacionadas aos movimentos de massa, tem-se observado um crescimento significativo nos últimos anos. Este panorama pode ser evidenciado diante do elevado número de estudos encontrados na literatura, como os descritos a seguir:

Movimentos de massa utilizando variáveis geomorfológicas extraídas por técnicas de Sensoriamento Remoto e SIG's no município de Caraguatatuba – SP (SESTINI, 2000); probabilidade bayesiana apoiada em SIG's, para geração de mapas de suscetibilidade a movimentos de massa no município de São Sebastião, litoral norte

do Estado de São Paulo (ARAÚJO, 2004); análise de estabilidade de vertentes a partir de uma abordagem quantitativa com uso dos SIG's para agregação e combinação dos parâmetros (KOZCIAK, 2005); identificação de áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamento de terra, utilizando ferramentas de análise espacial, disponíveis nos SIG's, em conjunto com modelo matemático na cidade de Salvador – BA (DIAS, 2006); SIG's para o desenvolvimento de uma metodologia para a determinação de áreas críticas a escorregamentos no Município de Juiz de Fora - MG, com modelo determinístico (ZAIDAN, 2006); suscetibilidade a movimentos de massa fazendo uso de Sensoriamento Remoto e SIG's na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul (VANACÔR, 2006); modelos SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability Analysis*) e TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration And Grid-Based Regional Slope Stability*) para previsão áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais rasos na Serra de Mar (SP) (VIEIRA, 2006).

Na literatura, são encontradas diversas abordagens metodológicas de mapeamento de suscetibilidade aos movimentos de massa que são classificados basicamente em três tipos: heurísticos, determinísticos e estatísticos. (CARRARA *et al.*, 1995; WESTEN *et al.*, 1997; GUZZETI *et al.*, 1999; BARREDO *et al.*, 2000; DAI *et al.*, 2002).

O heurístico representa o conhecimento do especialista, no qual este decide o tipo e o nível de suscetibilidade ou risco para um determinado local, utilizando mapeamento direto ou indireto, a partir de levantamentos de campo e de mapas geomorfológicos do terreno (WESTEN *et al.*, 1997). A vantagem deste método é que cada polígono delineado no mapa pode ser avaliado separadamente, baseado nas suas características únicas (CARRARA *et al.*, 1995; BARREDO *et al.*, 2000;). Porém, é um método que consome grande quantidade de tempo e depende diretamente da experiência e do conhecimento do avaliador. (BARREDO *et al.*, 2000).

O determinístico tem como base os modelos hidrológicos e de estabilidade, que levam em consideração informações detalhadas das encostas baseadas nos princípios de mecânica de solos (WESTEN *et al.*, 1997; DAI *et al.*, 2002). Este método procura zerar a subjetividade determinando graus de suscetibilidade em valores absolutos (BARREDO *et al.*, 2000). Um exemplo é o fator de segurança, definido basicamente,

pela relação entre as forças de resistência cisalhante e as de tensão cisalhante, são bem aplicados em mapeamentos de grande escala. Segundo Fernandes *et al.* (2001) e Kosciak (2005) sua grande desvantagem está no alto grau de simplificação para mapeamentos em escala média e regional, devido à grande variedade dos parâmetros geotécnicos.

O método estatístico tem como princípio a existência de relações entre os fatores condicionantes de instabilidade das vertentes e a distribuição dos processos de movimentos de massa na paisagem. A partir da combinação estatística destes fatores são determinados os graus de predisposição das encostas. Deste modo, assume-se que os fatores que causaram processos antigos são os mesmos que poderão acarretar processos futuros em outros pontos das encostas. (WESTEN *et al.*, 1997; GUZZETTI *et al.*, 1999; KOSCIK, 2005).

Diversos autores, entre estes: Mantovani *et al.* (1996); Fernandes *et al.* (1999); Parise (2001); Clerici *et al.* (2002) defendem que a produção de mapas adicionais, como mapas de suscetibilidade e de risco tem como ponto de partida o mapa de inventário constando registros de movimentos de massa pretéritos, normalmente construídos com informações obtidas em campo, fotografias aéreas e imagens de satélite, onde são identificadas cicatrizes deixadas nas encostas. Neste tipo de proposta, após a elaboração do mapa de inventário, são gerados mapas temáticos contendo informações sobre pedologia, geologia, geomorfologia, uso da terra, entre outros, para que posteriormente seja realizada a sobreposição ou combinação dos mapas, partindo da premissa de que em mesmas condições naturais que ocorreram processos no passado é que novos eventos poderão acontecer.

2.6.1 Avaliação Multicritério e padronização dos condicionantes

A Análise Multicritério tem por objetivo analisar várias possíveis ações levando em conta variáveis que interferem em determinados processos simultaneamente. É uma das técnicas empregadas para a tomada de decisão e sua integração com os SIG's foi considerada um avanço em relação ao procedimento convencional de

cruzamento de planos de informação para a priorização de áreas. (MALCZEWSKI, 1999).

Para desenvolver um modelo de suscetibilidade aos movimentos de massa nas encostas, uma série de variáveis de instabilidade das vertentes deve ser analisada, configurando-se em uma Avaliação Multicritério, técnica que parte da combinação entre vários fatores condicionantes e intrínsecos, pré-definidos criteriosamente. Portanto, os critérios considerados funcionam como variáveis/atributos que estão correlacionados uns aos outros, ocorrendo interferência mútua entre eles, em que todos influenciam individualmente e em conjunto no resultado final. De acordo com Delgado e Barredo Cano (2005, p. 43):

La evaluación multicriterio puede definir-se como um conjunto de técnicas orientadas a asistir em los procesos de toma de decisiones, investigando um número de alternativas bajo múltiples criterios y objetivos em conflicto, generando soluciones de compromiso y jerarquización de las alternativas.

Os critérios avaliados podem ser de dois tipos: fatores ou restrições e podem referir-se tanto a atributos do indivíduo como ao conjunto todo de decisão. Os fatores irão realçar ou diminuir a potencialidade de uma alternativa específica. As restrições podem ser entendidas como categorias restritivas das alternativas (fatores), excluindo áreas e limitando espacialmente a distribuição das possibilidades de escolha. (EASTMAN, 1998).

A seleção de critérios adotada para a análise é processada em ambiente SIG, o que vem ocorrendo de forma intensa nos últimos anos. Zambom *et al.* (2005, p. 183) afirmam que “a integração de SIG’s e de métodos de decisão multicritério vêm proporcionando inúmeros benefícios para a resolução de problemas de planejamento e gerenciamento do mundo real. Os modelos baseados em decisão multicritério são indicados para problemas onde existam vários critérios de avaliação.”

Tardivo (2001, p. 06) considera que:

Los procedimientos de evaluación multicriterio (EMC) integrados a los SIG aportan herramientas para asistir a la toma de decisiones, resolución de problemas espaciales complejos como la asignación de usos del suelo em um territorio y tratamiento de los datos temáticos o atributos orientados a la evaluación de las soluciones. Dentro del grupo de operaciones de análisis y modelado espacial

esta integración proporciona buenas perspectivas de desarrollo de los modelos de localización-asignación de actividades.

Neste contexto, as variáveis são submetidas à Avaliação Multicritério, na perspectiva de obtenção da modelagem espacial que defina níveis potenciais de ocorrência de movimentos de massa na área de estudo, sendo apresentados por meio de um mapeamento de suscetibilidade. Para viabilizar essa proposta, a Avaliação Multicritério apoia-se em uma modelagem matemática “abstrações no sentido de substituir objetos, forças, eventos, etc., por uma expressão que contém variáveis, parâmetros e constantes matemáticas.” (CHRISTOFOLETTI, 1999, p. 10).

Após a escolha dos critérios a serem submetidos à avaliação, para dar sequência ao processo de análise e tomada de decisão é necessário realizar a padronização dos mesmos, ou seja, um tratamento das variáveis para que essas fiquem compatíveis, com uma escala comum de medidas, uma vez que geralmente, estas apresentam-se com escalas de valores distintas.

A esse respeito Miranda (2005, p. 318) enfatiza que:

Além de diferentes escalas de valores é comum a existência de incompatibilidade entre os valores, pois as unidades de medida diferirão uma das outras. Nessa situação, é necessária uma maneira que possibilite a comparação dos valores. Essa incompatibilidade surge porque, normalmente, unidades não homogêneas de medidas são aplicadas na criação dos valores dos critérios. Por exemplo: um critério pode ser expresso em valores monetários, outro em hectares e outro ainda em uma escala qualitativa. O procedimento usual para permitir compatibilidade entre critérios é transformar os valores de critérios para uma unidade de medida comum.

O processo de padronização pode ser efetuado pelo método clássico *Booleano* ou pelo método *Fuzzy*. “A padronização *Booleana* é o método de Avaliação Multicritério mais comum em SIG e consiste em transformar todos os fatores em restrições e determinar valores de 0 ou 1.” (EASTMAN, 1998 p. 180).

Na Avaliação Multicritério (*Multi Criteria Evaluation - MCE*) pelo método *Booleano* clássico, os critérios são reduzidos a declarações lógicas de adequação e então combinados por meio de um ou mais operadores lógicos, tais como intersecção (AND) e união (OR). (EASTMAN 2001).

Este método tem como característica a “não compensação entre os fatores e a aversão ao risco nas tomadas de decisão. É muito conservadora em termos de risco porque a solução do problema é obtida satisfazendo a todos os critérios.” (CALIJURI; LOURES, 2006, p. 04).

Conforme Moreira (2002, p. 20) a Avaliação Multicritério *Booleana*:

Envolve a combinação lógica de mapas binários através de operadores condicionais. Cada mapa utilizado pode ser entendido como um plano de informação (evidência). Os vários planos de informação são combinados segundo uma sequência lógica para dar suporte a uma hipótese ou proposição definida. Para a aplicação da metodologia *Booleana* é necessário que os planos de informação (evidências) representem apenas duas classes, ou seja, que apresentem um padrão binário. Em planos de informação com representação temática a generalização é obtida através de uma reclassificação das diferentes classes para “favorável” e “não favorável”.

Meireles (1997, p. 44) destaca que na “classificação *Booleana* são obtidos resultados binários: 0 ou 1, ou seja, “*pertence*” à classe ou “*não pertence*” à classe, “*há risco*” ou “*não há risco*” e assim sucessivamente.”

A Avaliação Multicritério pelos métodos de agregação, Combinação Linear Ponderada (*Weighted Linear Combination – WLC*) e Média Ponderada Ordenada (*Ordered Weighted Average – OWA*) utilizam para normalização dos fatores a padronização *Fuzzy* (EASTMAN, 1998). Este procedimento é baseado nos preceitos da Lógica *Fuzzy*, também denominada de Lógica Nebulosa, caracterizado por ser menos rígido e mais próximo do raciocínio humano, converte os fatores para uma escala contínua, sem limite brusco de fronteira entre o sim e o não, admitindo novos valores entre os dois extremos, ou seja, considera valores intermediários entre o verdadeiro e o falso.

Segundo Zadeh²⁶ (1965) *apud* Malczewski (1999), a teoria dos conjuntos *Fuzzy* é, em resumo, o passo seguinte de aproximação entre a precisão da matemática clássica e a imprecisão do mundo real. O conjunto *Fuzzy* é uma generalização do conjunto ordinário. É definido a partir de um domínio contínuo, com graus de pertinência variando de 0 a 1 ou 0 a 255 (bytes), após a normalização.

²⁶ ZADEH, L. H. Fuzzy sets. **Information and Control**, v.8, p.348-353, 1965.

Xavier da Silva (2001, p. 154-155) acrescenta que “este procedimento possui característica de proximidade do raciocínio humano aplicado em situações comuns e, ao contrário da lógica clássica (*Booleana*), admite estágios intermediários entre as condições de negação e afirmação.”

Ainda nesse contexto, Liotte (2000, p. 02) destaca que “fatores avaliados podem ser reescalados em 0 (inapto) e 1 (apto), técnica *Booleana*, ou serem reescalados de acordo com alguma função para um intervalo particular comum, variando entre 0 e 1, técnica *Fuzzy*”. A FIGURA 11 apresenta um comparativo entre as fronteiras de aptidão das lógicas *Booleana* e *Fuzzy*.

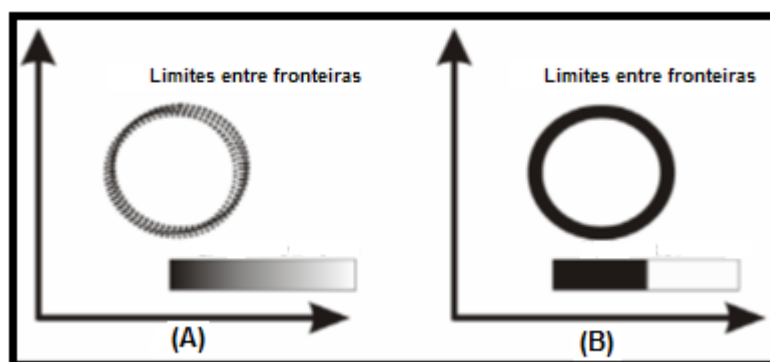


FIGURA 11 - Diferença entre a Fronteira Fuzzy (A) e Booleana(B). FONTE: Adaptado de Ruhoff (2004).

Segundo Burrough (1992, p. 5) “a utilização da técnica *Fuzzy* pode reduzir drasticamente a propagação de erros através de modelos lógicos, fornecendo informações mais confiáveis.”

Os benefícios de modelos apoiados em lógica *Fuzzy* estão relacionados à possibilidade de codificação de conhecimentos incertos, inexatos, numa forma que se aproxima muito aos processos de decisão humana. “Os sistemas de inferências baseados em lógica *Fuzzy* possibilitam, assim, a captura do conhecimento próximo ao ‘modelo cognitivo’ utilizado na análise de problemas. Isto significa que o processo de aquisição do conhecimento é mais fácil, mais confiável e menos sujeito a erros não identificados.” (RUHOFF *et. al.*, 2005, p. 4).

Segundo Silva (2003, p. 195):

Na lógica *Fuzzy*, os valores que pertencem estritamente a uma classe assumem valores de pertinência 1. À medida que os membros se afastam do valor central, são definidos numa amplitude de valores de pertinência com tendência a zero. A forma como os valores de pertinência são atribuídos à classificação contínua depende da função de pertinência, ou seja, a função que associa a cada elemento um valor no intervalo contínuo entre 0 e 1.

A padronização dos critérios, em que as medidas ou valores são convertidos para uma unidade comum é efetuado por meio das funções de pertinência *Fuzzy*, dessa forma, todas as variáveis assumem uma escala de medida única, possibilitando o processo integral de combinação e avaliação entre elas. Para Xavier da Silva (2001, p. 157):

A criação da função representa a geração de estimativas da possibilidade de ocorrência de um fenômeno que se julgue estarem associadas a instâncias (valores, posições ou classes) integrantes de um plano de informação ambiental. Se as instâncias forem expressas nas escalas de intervalo ou razão, isto é, como representativas de uma variável contínua, a função de pertinência pode ser entendida como a probabilidade de ocorrência do fenômeno. No caso de uma variável expressa na escala nominal, pode ser julgado razoável criar esta função de pertinência dispondo as categorias integrantes do plano de informação ao longo de um eixo, em ordem de importância (disposição ordinal), para a ocorrência do fenômeno ambiental em estudo. A partir desta disposição em ordem crescente ou decrescente poderá ser criada a função de pertinência, através de sucessivas estimativas da associação específica de cada uma das categorias arroladas com a ocorrência do evento ou entidade de interesse.

Eastman (2009) destaca que no *software* IDRISI o método de padronização *Fuzzy*, oferece quatro funções de pertinência:

- a) *Sigmoidal (s-shaped)*: mais comumente usada, requer as posições ao longo do eixo X, de 4 pontos de inflexão que regem a forma da curva, são indicadas como pontos a, b, c e d. Essa função assume diferentes formas: monotonicamente crescente, em que sobe de 0 a 1 e nunca cai; monotonicamente decrescente, começa no 1 cai e fica no 0 e simétricas que sobem e caem novamente (FIGURA 15 – A, B, C, D).
- b) *J-Shaped*: é bastante comum, salienta-se que essa função tende a 0, mas só o alcança no infinito, assim a inflexão dos pontos a e d indicam os pontos em que a função atinge 0,5 em vez de 0 (FIGURA 15 – E, F, G, H).
- c) *Linear*: usada extensivamente em dispositivos eletrônicos, em parte devido sua simplicidade (FIGURA 15 – I, J, K, L).

d) Definidos pelo usuário: quando a relação entre o valor e a pertinência não segue as três funções anteriores, a função definida pelo usuário é mais aplicável. Um número ilimitado de pontos de controle pode ser usado para definir a curva de pertinência (FIGURA 12 – M, N).

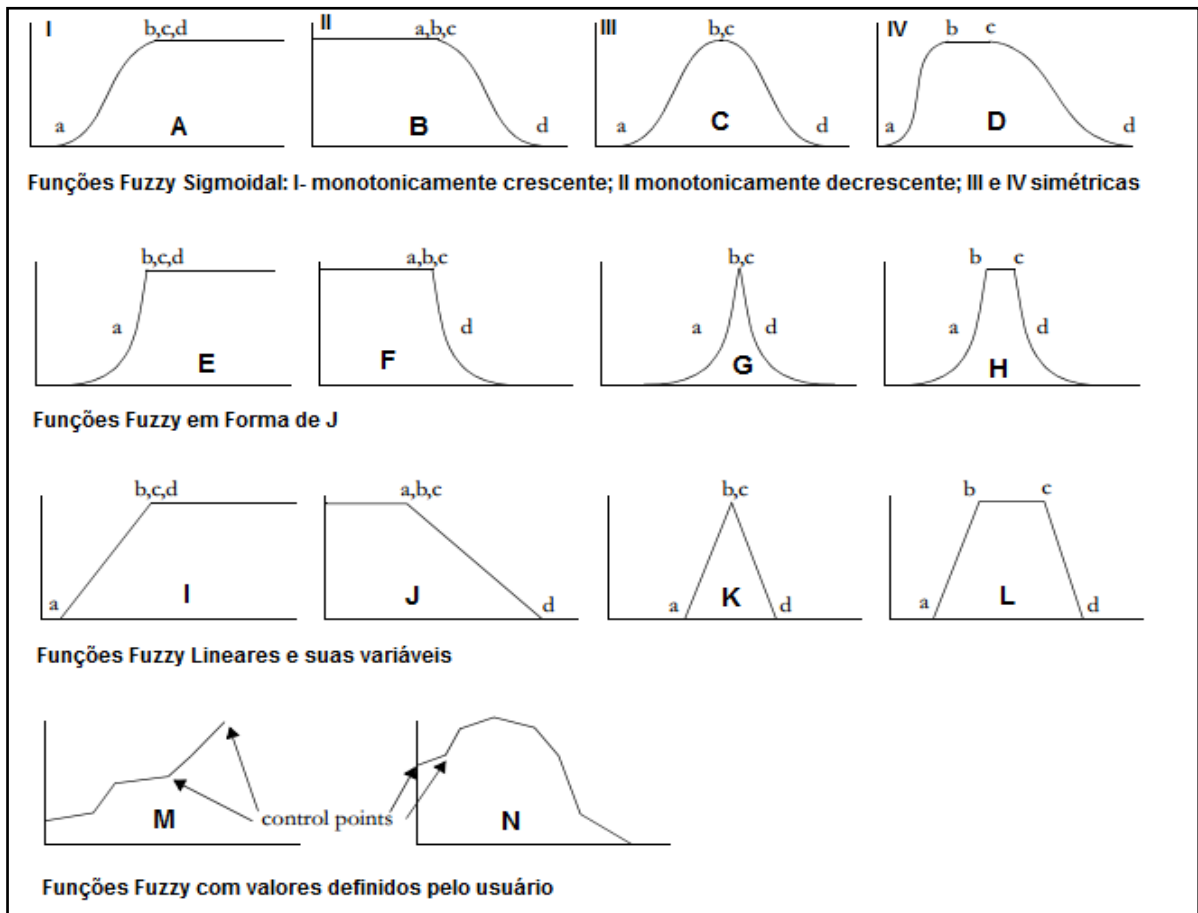


FIGURA 12 - Tipos de curvas de pertinência. FONTE: Adaptado de Eastman (2009).

Outro elemento importante em uma Avaliação Multicritério é a definição dos pesos para cada critério em análise, tendo em vista que para uma determinada proposta, uma variável pode ter uma importância maior do que outra. Dessa forma, é necessária a atribuição de uma importância relativa ou prioridade de cada critério em relação aos outros. “Essa prioridade pode ser expressa de duas maneiras: a) números quantitativos, conhecidos por pesos, e b) expressão qualitativa ou ordinal, que são chamadas de prioridades. O mais comum é trabalhar com pesos.” (MIRANDA, 2005, p. 318).

Saaty (1980) propôs uma técnica de atribuição de pesos chamado Processo Analítico Hierárquico (*Analytical Hierarchy Process - AHP*), em que a partir de diferentes pesos para cada variável, expressa sua potencialidade de influência individual no processo. Segundo o autor, a matriz de comparação é simétrica, sendo necessário preencher somente sua parte triangular inferior. A consistência dessa matriz é avaliada por sua Taxa de Consistência (TC), que indica a probabilidade de que os valores de comparação entre os fatores tenham sido gerados aleatoriamente. Os valores de TC devem estar sempre abaixo de 0,10 e no caso de estar acima deste valor, o autor sugere que se reorganize a matriz, alterando os valores entre os fatores.

A ponderação dos fatores realizada por meio da técnica AHP “possui base matemática que permite organizar e avaliar a importância relativa entre critérios e medir a consistência dos julgamentos, sendo uma das ferramentas de múltiplos critérios de decisão mais usada.” (CARDOZO; HERRMANN, 2011, p. 4136).

Segundo Câmara *et al.* (2001, p. 29):

Esta é uma técnica de escolha baseada na lógica da comparação pareada. Neste procedimento, os diferentes fatores que influenciam a tomada de decisão são comparados dois-a-dois, e um critério de importância relativa é atribuído ao relacionamento entre estes fatores, conforme uma escala pré-definida.

Complementando, Delgado e Barredo Cano (2005, p. 72-73) destacam que:

Este procedimento parte de estabelecer uma matriz cuadrada em la cual el número de filas y columnas está definido por el número de factores a ponderar, así se establece una matriz de comparación entre pares de factores, comparando la importancia de uno sobre cada uno de los demás.

Eastman (1998, p. 195) afirma que os “fatores com potencial elevado em uma determinada área, podem compensar outros com baixo potencial nesse mesmo local.” Nesta etapa, exige-se do pesquisador amplo conhecimento teórico e empírico para alcançar êxito ao contemplar adequadamente pesos aos fatores, além disso, o apoio de especialistas no assunto é providencial, no sentido de contribuírem com pontos de vistas multidisciplinares.

2.6.1.1 Combinação Linear Ponderada (*Weighted Linear Combination – WLC*)

A Combinação Linear Ponderada é um método de agregação multivariáveis bastante utilizado em análise espacial envolvendo estudos ambientais. Este método permite, após a padronização e ponderação das variáveis, a compensação entre todos os fatores, conforme peso ou grau de importância. Os critérios são agregados e combinados num processo de ponderação entre os mesmos. Os pesos (ou valoração) assumidos governam o grau com que um fator pode compensar outro. Para Eastman (1998, p. 188):

O procedimento WLC permite uma completa compensação entre todos os fatores. O grau com que um fator pode compensar outro, entretanto, é determinado pelo seu peso. Nesse sentido, um alto escore de potencial de determinado *layer* em uma determinada área pode compensar um baixo potencial em outro *layer* nessa mesma área. O WLC é uma técnica baseada nas médias e que coloca a análise exatamente a meio caminho das operações AND (mínimo) e do OR (máximo), isto é, nenhum risco extremo e nenhum extremo de aversão ao risco.

Na Combinação Linear Ponderada os critérios (fatores) são padronizados para uma escala numérica comum (padronização *Fuzzy*), recebem pesos de importância e são combinados por meio de uma média ponderada. O resultado é um mapa de prioridades, que pode ser limitado espacialmente por uma ou mais restrições *Booleanas* (EASTMAN, 1998).

Segundo Kangas²⁷ *et al.* (1998) *apud* Valente (2005, p. 9) este método apresenta como “principais vantagens em relação à lógica *Booleana*, a representação contínua da paisagem e a possibilidade dos fatores receberem pesos de acordo com a importância que possuem para o objetivo do trabalho.”

De acordo com Valente e Vettorazzi (2005), para a definição de áreas sensíveis, prioritárias ou de risco, o método da Combinação Linear Ponderada vem sendo empregado em diversas aplicações. Na área ambiental existem estudos com o emprego dessa técnica no campo da conservação e preservação florestal, para a

²⁷ KANGAS, J.; ALHO, J.; KOLEHMAINEN, O.; MONONEN, A. Analyzing consistency of experts' judgments – case of forest biodiversity. **Forest Science**, v.44, p. 603-609, 1998.

conservação de ecossistemas importantes, mapeamentos de áreas de risco de incêndios florestais e também projetos de conservação de recursos hídricos por meio da recuperação e da conservação da vegetação.

2.6.1.2 Média Ponderada Ordenada (*Ordered Weighted Average – OWA*)

Introduzido por Yager (1988) o método denominado de Média Ponderada Ordenada – OWA é similar ao anterior, pois os critérios são padronizados e ponderados do mesmo modo, restrições são máscaras *Booleanas* e fatores são mapas contínuos de potencialidade, ponderados de acordo com sua importância relativa. Entretanto, na OWA, um segundo conjunto de pesos, de ordenação, são aplicados aos fatores.

Os pesos de ordenação possibilitam o maior controle sobre o nível global de compensação entre os fatores, assim como do nível de risco na determinação da aptidão e/ou potencialidade (EASTMAN, 1998). Estes pesos não estão associados aos critérios, mas sim à ordem que lhes é atribuída depois da aplicação da técnica WLC. (YAGER, *op. cit.*).

Malczewski (2004) considera que com o método OWA, tem-se a flexibilidade de assumir soluções que variam desde totalmente aversas ao risco (operador de intersecção AND – um local deve atender todos os critérios para ser incluído no conjunto de decisão) a totalmente arriscadas (operador de união OR – um local será incluído no conjunto de decisões se pelo menos um critério for atendido).

De acordo com Jiang e Eastman (2000) os pesos de ordenação controlam a maneira pela qual os pesos de compensação serão agregados e determinam o nível de compensação necessário entre os fatores. Ocorrendo casos em que um fator ao qual foi atribuído alto peso de compensação possa receber, por exemplo, um baixo peso de ordenação.

O controle sobre o nível de risco e sobre a compensação é feito especificando-se um conjunto de pesos de ordenação para as diferentes posições de ordem hierárquica dos fatores em cada local. Os pesos de ordenação governarão primeiramente o grau com o qual os pesos dos fatores terão influência no procedimento de agregação. (CALIJURI; LOURES, 2006).

Neste método, os pesos de ordenação não se aplicam a qualquer fator. Eles são aplicados pixel a pixel a escores de fatores, determinado pelo ranqueamento desses fatores em cada local (pixel). O peso de ordenação 1 (um) é assinalado ao fator de menor ranqueamento para aquele pixel (isto é, fator com menor escore), peso de ordenação 2 (dois) para o próximo fator melhor ranqueado, e assim por diante (EASTMAN, 2001).

Cereda Junior (2011, p. 76) acrescenta que após a aplicação do primeiro conjunto de pesos aos fatores, na WLC, os pesos resultantes são ordenados do valor mais baixo para o mais elevado, sendo que ao fator com o peso mais baixo (o primeiro da lista ordenada) é aplicado o primeiro peso de ordenação, ao fator com o segundo valor mais baixo é aplicado o segundo peso de ordenação, e assim sucessivamente, ou seja, trata-se de pesar os fatores com base na sua ordem, do mínimo para o máximo.

3. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa desenvolveu-se na Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí, localizada nos municípios de Morretes e Paranaguá, Estado do Paraná, inserida no subcompartimento de relevo denominado Serra da Prata (FIGURA 13), ramificação entre os compartimentos da Serra do Mar e Planície Litorânea. Situa-se entre as coordenadas geográficas 25°30'29" S, 25°37'44" S, 48°42'18" W, e 48°39'62" W, distando aproximadamente 80 km da capital Curitiba e 20 km do centro de Paranaguá, com área total de 41,27 km² e acesso direto pela rodovia BR-277 (FIGURA 14).



FIGURA 13 - Foto com visão panorâmica da Serra da Prata, na Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí. Estrada rural que dá acesso à Comunidade Floresta. FONTE: O autor (2014).

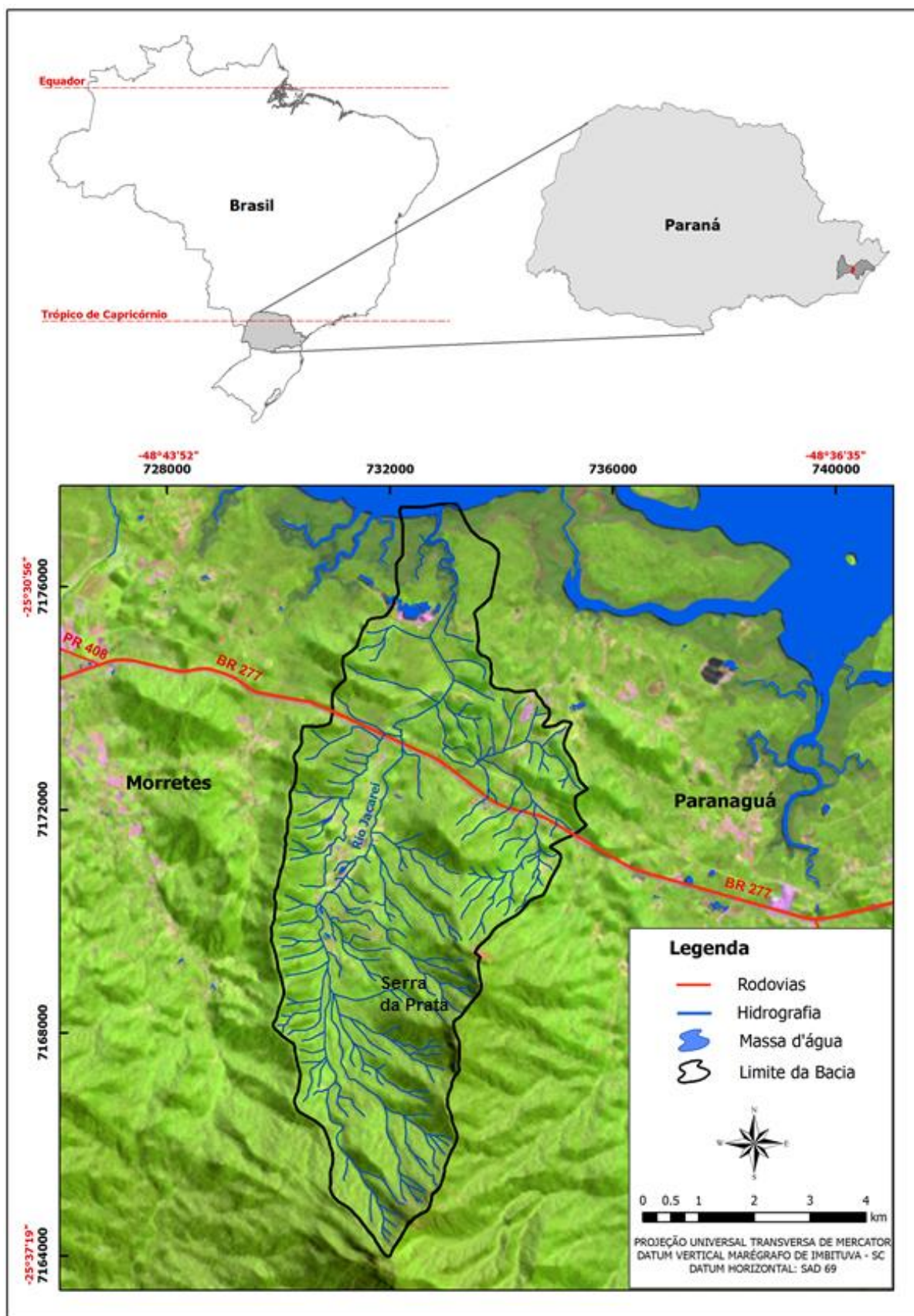


FIGURA 14 - Cartograma com a localização da Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí, divisa entre os municípios de Morretes e Paranaguá – PR. FONTE: Imagem LANDSAT 5 TM 200-078 de 15/02/2010. Org.: Lohmann (2013).

A Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí, por estar inserida no conjunto da Serra do Mar (Serra da Prata) e da Planície Litorânea, assume características físico-naturais regionais, descritas a seguir:

3.1 CLIMA

As características do relevo, a direção dos ventos e massas úmidas e o efeito da maritimidade, devido à proximidade com o oceano Atlântico, são condições importantes que atuam diretamente na configuração climática da área. “As principais influências ocorrem na temperatura, na redução da amplitude térmica diária e anual, no aumento da umidade relativa do ar e na quantidade de chuva.” (IPARDES, 1990, p. 07).

Conforme a classificação elaborada por Koppen utilizada pelo Instituto Agrônomo do Paraná - IAPAR (1978 e 2000), a Serra do Mar e, portanto, a Serra da Prata e imediações é influenciada por dois tipos climáticos Cfa e Cfb, com diferenças de temperatura devido à variação de altitude. Nas partes baixas da serra e planície litorânea predomina o clima Cfa, com temperatura média no mês mais frio inferior a 18° C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente acima de 22° C, com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida. Nas partes elevadas da serra, o clima é o Cfb com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18° C (mesotérmico), com verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22° C e sem estação seca definida e ocorrência de geadas. “O tipo Cfa abrange a altitude de 0 a 700 m e o Cfb de 700 a 1665 m, ponto máximo situado na Serra do Papanduva.” (IPARDES, 1991, p. 13).

Considerando que a temperatura reduz à medida que aumentam as altitudes, Maack (1968) registrou, por meio de observações em campo, que na Serra do Mar paranaense, ocorre queda de 1° C a cada 200 metros de altitude. Roderjan (1994) registrou índices de 0,56° C de redução para cada 100 metros. Vanhoni e Mendonça (2008, p. 53) ao elaborarem estudos climáticos no litoral paranaense, concluíram que “a média anual fica entre 16° e 18°C na planície decaindo com o aumento da altitude; nas Serras e Morros, a média anual situa-se entre 11° e 13°C.”

Com relação à pluviosidade, a região litorânea do Paraná apresenta índices significativos distribuídos ao longo do ano, com concentração nos meses mais quentes. Para a Serra do Mar MAACK (1968), destaca a influência do alísio de SE e a ação das chuvas orográficas de ascensão na frente oceânica da serra determinam variações expressivas entre as médias anuais, ainda que sempre bastante elevadas se comparadas a outras regiões do Estado. Especificamente na Serra da Prata o IAPAR (1978 e 2000) indica que ocorre uma variação entre 1800 e 2500 mm ao ano sendo o verão a estação mais chuvosa.

Kozciak (2005) registra que a sazonalidade do regime das precipitações é mais intensa nos meses de verão devido ao impacto das frentes frias, quando se concentra a estação chuvosa. Em contrapartida nos meses frios de inverno ocorre um período mais seco. Considera ainda que no verão é comum as chuvas convectivas que ocorrem durante à tarde e/ou à noite, devido forte evaporação do aquecimento diurno.

Segundo Bigarella *et al.* (1978, p. 44):

No Paraná a Serra do Mar e suas ramificações, formam compartimentos que servem de anteparo e aprisionam o ar frio em sua marcha para o norte. Este ar forma com o ar fronteiriço uma “frente” especial. Ele é comprimido no sopé das serras, aquecendo-se adiabaticamente e, em sua ascensão torna-se saturado. A serra é então envolvida por nevoeiro ou submetida a chuvas próprias às frentes frias. A turbulência que se verifica no sopé da serra forma nuvens, tipo estrato e nimbo-estrato. O tempo caracteriza-se pela acentuada nebulosidade e acentuada umidade atmosférica. Quando a frente fria permanece estacionária, em posição paralela à costa ocorrem chuvas torrenciais, persistentes e forte nebulosidade.

Vanhoni e Mendonça (2008, p. 56-57) constataram que:

A média pluviométrica anual no litoral do Paraná é de 2435,8mm, sendo que a máxima é registrada na estação Veu de Noiva (em Morretes) com média de 3465,4mm, e a mínima registrada na estação de Morretes, com média de 1958,7mm. Os dados excepcionalmente altos da estação Veu de Noiva (680 m de altitude) podem ser explicados pela sua localização num vale profundo, com orientação favorável para a penetração das massas de ar provenientes do oceano Atlântico.

Conforme descrito, no litoral paranaense e no conjunto da Serra do Mar, os índices pluviométricos são relativamente elevados, a diferença local decorre de chuvas orográficas com grande volume d'água nas cabeceiras das encostas devido à ascensão

das massas úmidas frente ao relevo montanhoso. Utilizando-se de dados da rede de estações do Instituto das Águas do Paraná e do Instituto Tecnológico SIMEPAR, num total de 25 estações (QUADRO 2), foram gerados os mapas de precipitação sazonais, para a região litorânea e o mapa com as médias anuais da área de estudo (FIGURAS 15 e 16).

Utilizou-se para a espacialização dos dados (FIGURAS *op. cit.*) o método de interpolação *kriging* (krigagem), tendo como base o modelo de *Semivariograma Exponential*, presente na extensão *Spatial Analyst* do ArcGIS 10. O modelo foi adotado em virtude dos resultados satisfatórios obtidos em diversos trabalhos conceituados desenvolvidos com sua utilização, citam-se: Cartas Climáticas do Paraná (CAVIGLIONE *et al.*, 2000); Zoneamento de Riscos Climáticos para a Cultura do Café no Estado do Paraná (CAMARORI, 2001); Atlas Climáticos da Região Sul do Brasil. (WREGE, 2011).

Estação	Latitude	Longitude	Altitude(m)	Período de Dados
Guaratuba	-25,878	-48,618	5	1975 – 2011
Pedra Branca	-25,917	-48,883	613	1962 – 2011
Morro Grande	-25,950	-48,700	20	1973 – 2000
Cubatão	-25,817	-48,750	12	1975 – 1997
Morretes	-25,467	-48,833	13	1940 – 2011
Véu da Noiva	-25,433	-48,950	715	1941 – 1996
Est. Experimental	-25,509	-48,817	20	1966 – 2007
São João da Graciosa	-25,389	-48,858	105	1975 – 2011
Ipanema	-25,667	-48,450	6	1972 – 2011
Guaraguaçu	-25,667	-48,500	18	1975 – 1996
Costão	-25,267	-48,300	166	1975 – 2011
Rio Guaraqueçaba	-25,083	-48,217	294	1975 – 2011
Passo Vau	-25,200	-48,467	288	1975 – 2011
Bananal	-25,182	-48,403	8	1975 – 2011
Guaraqueçaba	-25,300	-48,333	4	1951 – 1980
Matinhos	-25,817	-48,533	5	1949 – 1980
Paranaguá	-25,517	-48,517	9	1925 – 2007
Alexandra	-25,567	-48,633	8	1940 – 1991
Colônia Santa Cruz	-25,597	-48,625	16	1975 – 2011
Antonina	-25,22	-48,80	780	1977 – 2011
Morretes	-25,50	-48,82	59	1966 – 2011
Cerro Azul	-24,82	-49,25	402	1997 – 2011
Guaratuba	-25,87	-48,57	73	1997 – 2011
Guaraqueçaba	-25,30	-48,33	2	1977 – 2011
Pinhais	-25,42	-49,13	919	1970 – 2011
Curitiba	-25,45	-49,23	923	1997 – 2011

QUADRO 2 - ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS PARA ESTUDO DE PRECIPITAÇÃO DO LITORAL E DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JACAREÍ.

FONTE: Instituto das Águas do Paraná e Instituto Tecnológico SIMEPAR (2013). Org.: O autor (2013).

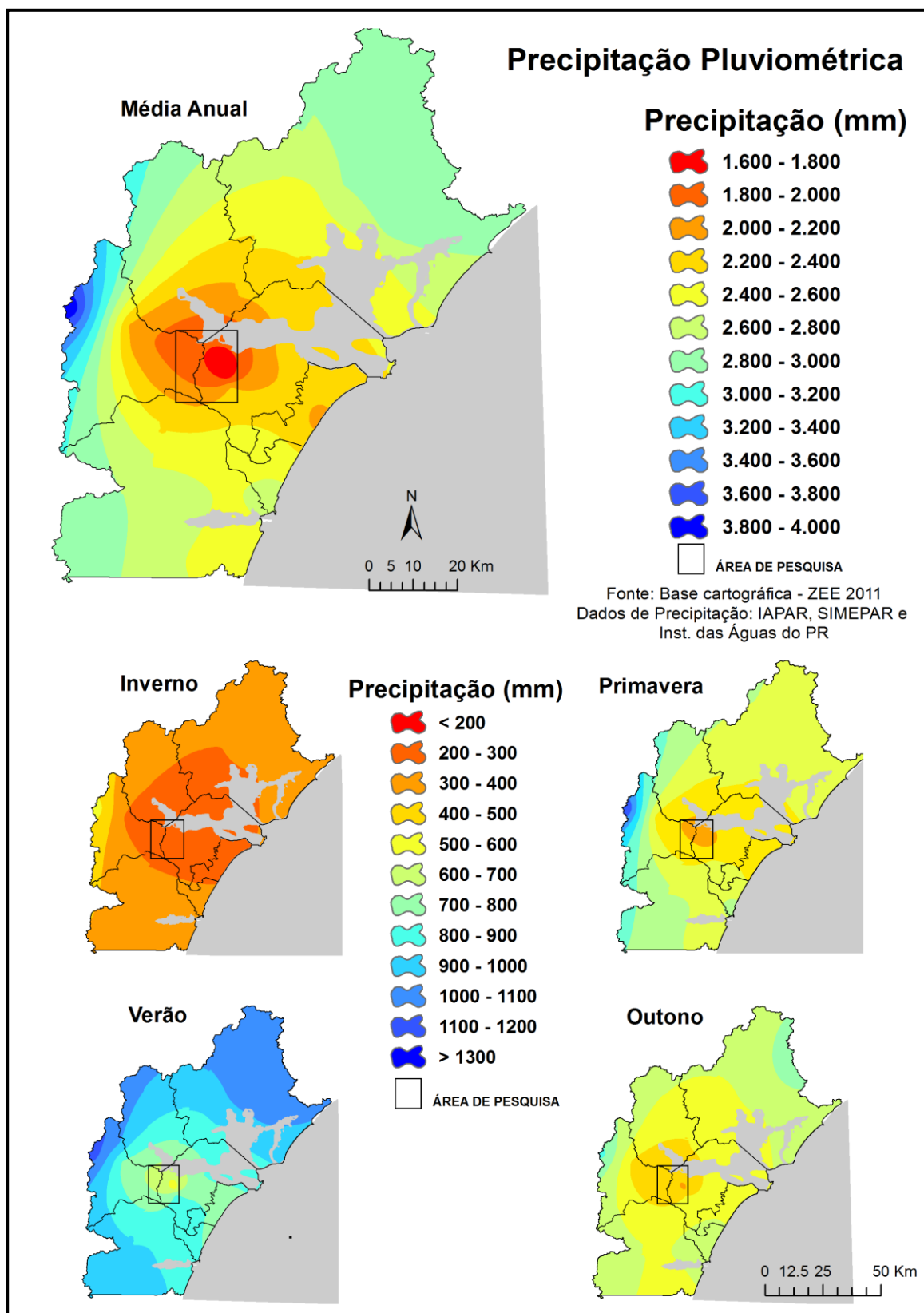


FIGURA 15 - Precipitação média anual e sazonal do litoral paranaense. Detalhe parcial da área de pesquisa conforme figura 16, pág. 91. FONTE: Base cartográfica – ZEE 2011. Dados de precipitação do IAPAR, SIMEPAR e Instituto das Águas do Paraná. Org.: Lohmann (2013).

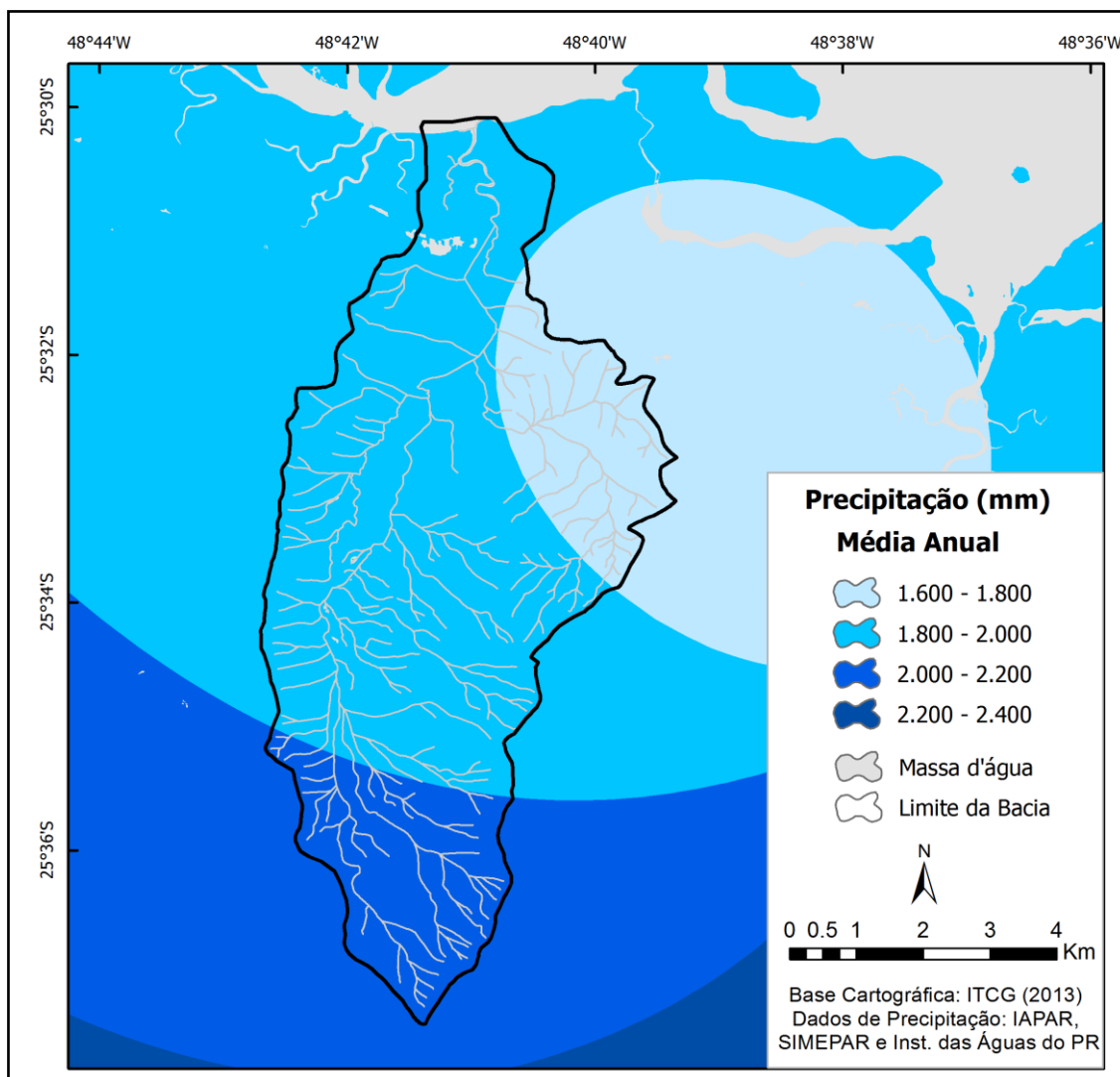


FIGURA 16 - Precipitação média anual da Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré e imediações. FONTE: Base cartográfica – ZEE 2011. Dados de precipitação do IAPAR, SIMEPAR e Instituto das Águas do Paraná. Org.: Lohmann (2013).

Com relação ao regime dos ventos, segundo o IPARDES (1990) no litoral e Serra do Mar, os ventos são influenciados tanto pela circulação geral das massas de ar, quanto por fatores locais, como o aquecimento diferenciado entre terra e água. Prevaecem os ventos influenciados pelo anticiclone do Atlântico sul e pelo vento alísio de sudeste, principalmente na direção mar continente.

Os ventos mais fortes ocorrem na primavera e no verão, sendo que nos meses de outono e inverno estes se tornam mais brandos. No verão, predominam ventos provenientes do quadrante norte (N e NW), enquanto que nos meses de inverno são

mais comuns os ventos oriundos do quadrante sul (S e SE). (MAACK, 1968; IPARDES, 1991, BLUM, 2006).

Para Bigarella *et al.* (1978, p. 45) “os ventos predominantes da região vêm do quadrante sudeste. Estes ventos são deflectidos em parte para o norte pelas montanhas da Serra da Prata situada a sul-sudoeste de Paranaguá. Os ventos da orla marinha procedem predominantemente de sudeste e de leste.” Por conta da topografia da região, a circulação dos ventos se torna bastante complexa, referindo-se especificamente a estação instalada no município de Morretes, entre a Serra dos Órgãos, da Graciosa, do Marumbi e da Farinha Seca ao norte e oeste e entre as Serras da Igreja, das Canavieiras e da Prata, a sudeste, o IAPAR (2000) considera que prevalecem na região os ventos de nordeste (FIGURA 17).

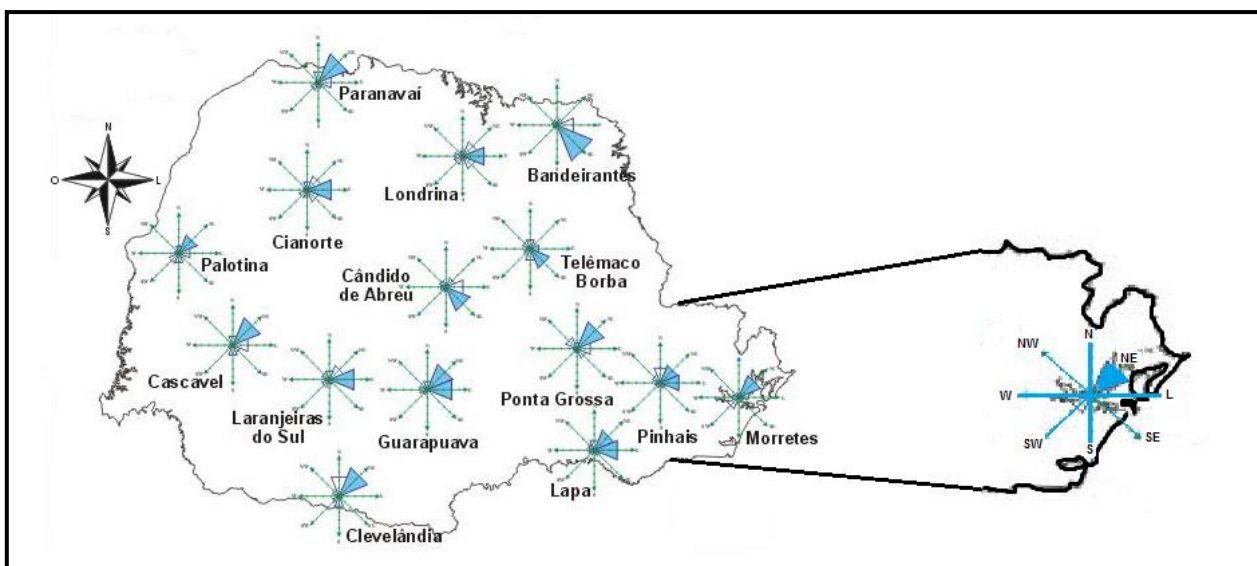


FIGURA 17 - Direção predominante dos ventos no Estado do Paraná, frequência média anual. Destaque para região onde se localiza a área de estudo. FONTE: IAPAR (2000). Adaptado pelo autor.

A topografia também interfere diretamente no regime das chuvas na região. Nesse aspecto, destaca-se na área de estudo a frequência das chuvas orográficas de grande volume, que são originadas quando massas de ar saturadas de umidade são transportadas para oeste até terem seu trajeto interrompido pelas elevações da Serra do Mar, o que ocasiona o seu acúmulo na face leste destas montanhas. Acima do nível de condensação as massas de água precipitam em forma de chuvas. (MAACK, 1968; IPARDES, 1990).

Corroborando, Passos (2000, p. 79) reconhece que a “Massa Tropical Atlântica de origem quente e úmida, quando forçada a ascender pela ação da frente fria produz chuvas no inverno; no verão, fora da ação do anticiclone Atlântico produz os conhecidos aguaceiros locais nas tardes. Possui uma inversão térmica que oscila em altitude; mais baixa no verão e alta no inverno, fato do qual decorrem as chuvas orográficas quando de sua ultrapassagem na Serra do Mar.”

3.2 GEOLOGIA

Pertencente à porção do extremo oriente do Estado do Paraná, o estudo se desenvolveu numa área caracterizada pela diversidade litológica, na porção de terreno localizada como parte da Planície Litorânea e Serra do Mar.

A Serra do Mar Paranaense configura-se como uma cadeia de montanhas marginal do Primeiro Planalto, separando-o da Planície Litorânea, com cimos elevados até 1.800m de altitude e sustentada por litologias diversas, quase sempre metamórficas de alto grau como migmatitos, gnaisses e xistos e mais raramente quartzitos, frequentemente associados com rochas intrusivas relacionadas a ciclos metamórficos mais jovens. (OKA-FIORI *et al.*, 2006 p. 12).

A Planície Litorânea, de acordo com Bigarella *et al.* (1978, p. 35),

É constituída de sedimentos inconsolidados do Pleistoceno Superior e do Holoceno. Trata-se de formações de origem variada, compreendendo: a) sedimentos arenosos das restingas; b) depósitos fluviais em parte arenosos e principalmente siltico-argilosos; c) sedimentos detrítico-orgânicos, pantanosos de antigas lagoas ou planícies de inundações. A maior parte das rochas cristalinas aflorantes nas áreas circunvizinhas à Baía de Paranaguá pertencem ao Pré-Cambriano Superior. São desse período os migmatitos, granitos de anatexia, gnaisses e anfibolitos, com idade aproximada de 550 a 600 m.a., estas afloram em vastas áreas da região litorânea e da Serra do Mar.

Referindo-se à geologia da Serra da Prata, Blum (2006, p. 08) reporta-se aos estudos de Lopes²⁸ (1985, 1987a e 1987b) que identificou e descreveu quatro variedades graníticas na região, denominadas:

²⁸ LOPES, O. F. **Nota preliminar sobre a geologia da Serra da Prata – Paraná.** Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, v. 36, p. 65-68. 1985.

- ✓ **Rio Canavieiras:** ocorre na porção oeste da Serra da Prata, representado por fácies médio-cristalinas, geralmente maciças e homogêneas, com fácies cataclásticas muito subordinadas;
- ✓ **Cubatãozinho:** encontrado numa estreita faixa na porção central da serra representa um estreito e alongado maciço de configuração estratiforme;
- ✓ **Rio do Poço:** presente na porção nordeste, trata-se de um Leuco-Granito médio cristalino, sin-tectônico e intrusivo na Formação Rio das Cobras. O Granito Rio do Poço sustenta o próprio maciço rochoso da Serra da Prata;
- ✓ **Suíte Morro Inglês:** ocorre na porção leste da serra, sendo limitado a oeste por uma nítida falha e a leste no seu encontro com a planície litorânea.

Especificamente sobre a composição geológica da Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí, o mapeamento da área realizado pela MINEROPAR (2011) identificou as seguintes formações litológicas: Formação Alexandra, Aluviões, Colúvios, Tálus, Formação Rio das Cobras, Granito Morro Inglês, Planície Costeira e os Sedimentos Paleoestuarinos.

A **Formação Alexandra** é “constituída por sedimentos, jazentes discordantemente sobre as rochas gnáissicas do Complexo Cristalino Brasileiro. A porção inferior é constituída em grande parte por sedimentos de caráter arenáceo e rudáceo, predominando no restante, sedimentos siltico-argilosos e os arcossianos.” (BIGARELLA *et al.* 1978, p. 106).

Angulo (2004, p. 30) afirma que:

Os depósitos da Formação Alexandra ocorrem em colinas isoladas, niveladas topograficamente em altitudes em torno de 30 m. Os tipos principais de sedimentos que a constituem são areias arcoseanas e lamas e subsidiariamente, cascalhos, argilas e, num único afloramento, uma camada de linhito.

LOPES, O. F. **Zoneamento metamórfico da Formação Rio das Cobras do Pré- Cambriano do Estado do Paraná.** In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3., 1987, Curitiba. Anais... Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia, 1987a, v. 1, p. 303-312.

LOPES, O. F. **O Granito Sin-Tectônico Cubatãozinho: petrogênese e evolução Geológica.** In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3., 1987, Curitiba. Anais... Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia, 1987d, v. 1, p. 390-398.

Os **Aluviões** “são sedimentos carregados e depositados pelos rios. Este material é arrancado das margens das vertentes sendo levados em suspensão pelas águas que o acumulam em bancos constituindo depósitos aluvionares.” (GUERRA; GUERRA, 2008, p. 39).

Encontram-se na planície de inundação da bacia do Rio Jacareí, material aluvial diversificado, como: silte, argila, areia, seixos e cascalhos, resultante do trabalho imposto pelos rios e águas pluviais, conforme verificado em campo (FIGURA 18).



FIGURA 18 - Imagem demonstrando material arenoso e com seixos menores retrabalhados pela ação fluvial, aproximadamente um ano após a corrida de lama de março de 2011, depositados à margem esquerda do Rio Jacareí, área de planície de inundação. FONTE: O autor (2012).

Os **Colúvios** são materiais transportados, vertente abaixo, principalmente pelo efeito da gravidade (FIGURA 19 e 20), os detritos que aparecem no sopé das vertentes, principalmente as mais íngremes, são denominados de **Tálus**. (BIGARELLA; MOUSINHO, 1965; GUERRA; GUERRA, 2008).

Angulo (2004, p. 33) ressalta ainda que:

No sopé das vertentes mais íngremes da serra, frequentemente ocorrem acúmulos de sedimentos, cujas superfícies de deposição formam rampas de forte inclinação, não apresentam evidências de processos fluviais, ocorrendo aparentemente um predomínio do processo de queda de detritos. Em alguns casos, as rampas apresentam ravinamento, com padrão paralelo e não radial, como nos leques. Sob a denominação colúvios incluíram-se sedimentos associados às vertentes da serra, nos quais não se observam evidências de transporte por fluxos de baixa viscosidade. Trata-se de sedimentos predominantemente finos, com proporções variáveis de areia e seixos, geralmente, sem estruturas.



FIGURA 19 - Areia, seixos e outros materiais detríticos incluindo mistura de solos, árvores, lixo e resto de edificações destruídas, transportados e depositados pela corrida de lama de março de 2011 na margem esquerda do Rio Jacareí. FONTE: O autor (2012).



FIGURA 20 - Fotografia ilustrando exposição de depósitos coluvionares, recobrindo matacões na margem direita do rio Tingidor, afluente do Jacareí, com elevado grau de intemperismo, inclusive com esfoliação esferoidal em afloramento de rocha. Evidências deslocamentos pretéritos. FONTE: O autor (2012).

Observou-se que os depósitos de colúvios e tálus no sopé das vertentes da área de estudo, são compostos por material misto, de seixos, areias, silte e outros com estruturas variadas, acumulados nas partes inferiores das encostas, por movimentos de massa ocorridos em épocas anteriores. A análise do material coluvial pode ser eficiente por possibilitar a caracterização de movimentos de massa pretéritos auxiliando no entendimento de eventos contemporâneos.

Conforme o IPARDES (1991, p. 32) a **Formação Rio das Cobras** compõe, juntamente com a Suíte Gnáissica Morro Alto, o Complexo Metamórfico Serra da Prata e é representada genericamente por biotita xistos, muscovita-biotita xistos, clorita xistos, calcoxistos e quartzo xistos, com xistos granatíferos subordinados, bem como quartzitos e meta-ultrabásicas locais, datando do Proterozóico Inferior (2,5 a 1,8 b. a.). Essa

litologia está concentrada nas vertentes da margem esquerda do rio Jacareí, nas cabeceiras de drenagem, no lado oeste da Serra da Prata.

A **Suíte Morro Inglês** situada na porção leste da Serra da Prata, com altitudes que superam os 1300 metros, influencia diretamente a drenagem e o relevo da região. A composição litológica é definida pelo IPARDES (1991, p. 34) como leuco-granito porfírico, com mineralogia apresentando ortoclásio e microclina em pórfiros isso-orientados N-S e também por titanita, oligoclásio e simplectitos de quartzo-feldspato potássico, em uma matriz quartzosa pobre em biotita.

De acordo com a MINEROPAR (2011) entre o Granito Morro Inglês, a planície aluvial e os depósitos de colúvios, encontra-se uma litologia composta de gnaisses, migmatitos, granitos cisalhados e xistos, observadas nos vales dos rios Tingidor e Cachoeira.

Outra unidade geológica encontrada na bacia hidrográfica do Rio Jacareí é a **Planície Costeira** que conforme Bigarella *et al.* (1978, p. 105) “é formada por terraços arenosos conhecidos pela designação de restinga, são de origem marinha, fluvial e/ou eólica.” Essa formação é encontrada na bacia, no baixo curso do rio Jacareí, entre as áreas de manguezal e os **Sedimentos Paleoestuarinos**. Os últimos, de acordo com Angulo (2004, p. 35) “ocorrem em áreas planas com altitude inferior a 7 m e não apresentam alinhamentos visíveis. Predominam areias, ocorrendo subsidiariamente areias argilosas, areias siltosas e silte argilo-arenoso.”

A composição litológica da Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí pode ser visualizada no cartograma (FIGURA 21) elaborado pela MINEROPAR (2011) a partir do Mapa Geológico do Estado do Paraná (2001) em escala original 1:250.000 da própria instituição.

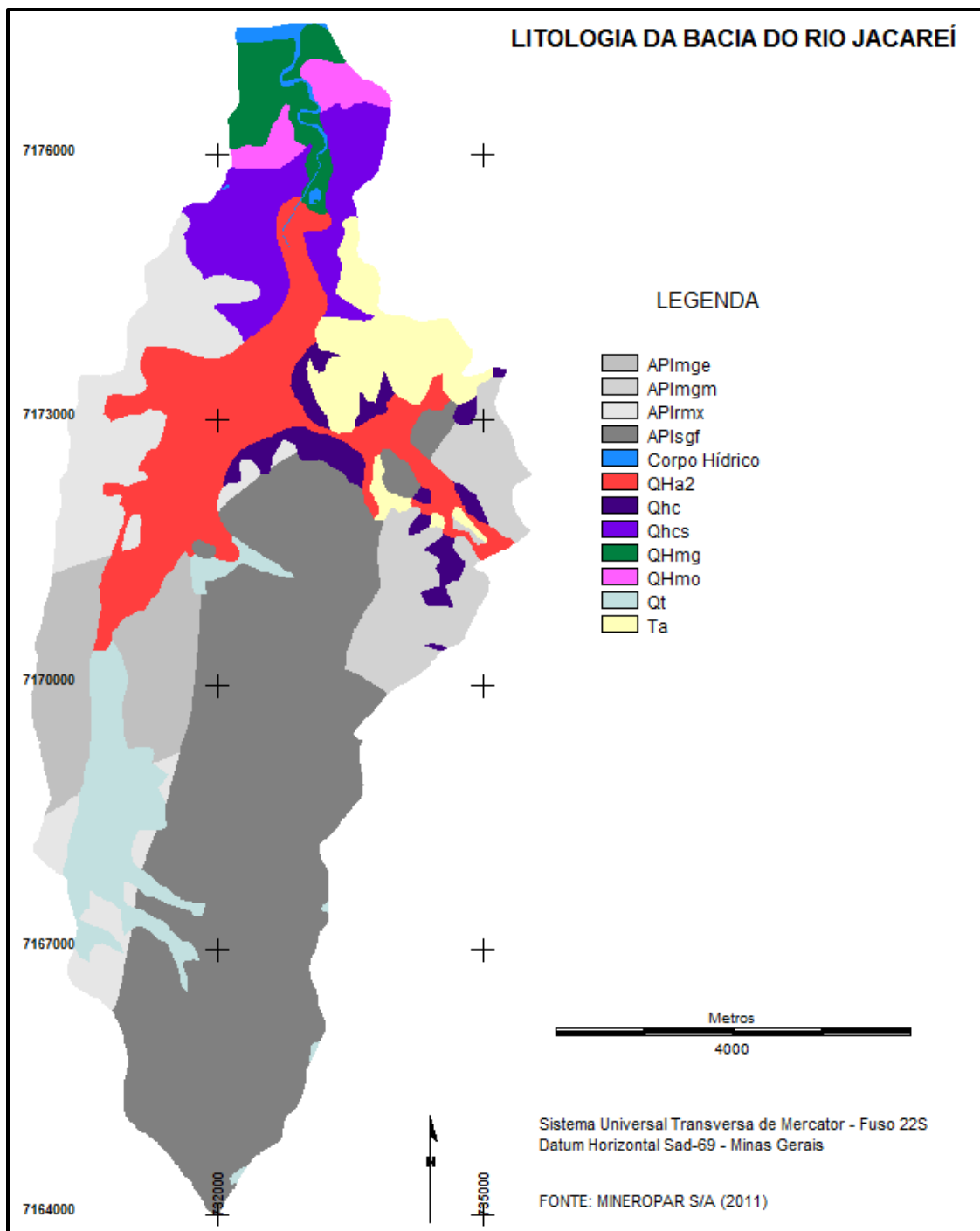


FIGURA 21 – Cartograma com a litologia da Bacia Hidrográfica do Rio Jacaréí. APlmge – Migmatitos estromáticos com paleosoma de biotita-hornblenda gnaiss e mica-quartzo xisto. APlmgm - Migmatitos oftálmicos, com paleosoma de biotita gnaiss, localmente com quartzitos. APlrmx - Biotita-muscovita xistas e clorita-biotita-muscovita xistos, com ocorrências locais de quartzo xistos e quartzitos. APlsgf - Suíte granítica foliada, granitos metassomáticos ou de anatexia, indiferenciados. QHa2 - Aluviões recentes. Qhc – Depósito de colúvio associados a depósitos de tálus, com argila, silte e areia, seixos. Qhcs - Cascalheiras continentais retrabalhadas. QHmg - Sedimentos fluviomarinhos, associados à manguezais. QHmo – Sedimentos argilo-siltico-arenoso, paleoestuarinos. Qt – Depósitos de tálus, blocos em matriz argilosa. Ta – Formação Alexandra (conglomerados, arcósios, areias e argilitos). Org.: O autor (2014).

3.3 GEOMORFOLOGIA

Considerando os aspectos geomorfológicos regionais, Maack (1968, p. 86) estabelece uma divisão em “duas sub-regiões geográficas a montanhosa litorânea e a planície litorânea.” A sub-região montanhosa é composta pela Serra do Mar e suas ramificações, incluindo a Serra da Prata. Bigarella *et al.* (1978, p. 69) destacam que:

No Estado do Paraná, a Serra do Mar separa-se do Atlântico por baixadas colúvio-aluvionares com larguras variáveis desde poucos quilômetros até cerca de 50 Km. Não chega a formar escarpas diretamente sobre o mar. A extremidade sul da Serra da Prata termina junto a enseada que precede a entrada da Baía de Guaratuba. A Serra do Mar constitui a zona limítrofe entre o primeiro planalto e a planície costeira. Além de representar um degrau (escarpa), forma serras marginais descontínuas, que se elevam de 500 a 1000m acima do nível do planalto. Constitui um conjunto de montanhas em blocos, escarpas e restos de planaltos profundamente dissecados. Sua configuração generalizada é de um grande arco com concavidade voltada para leste subparalelo à linha da costa. Toma-se as direções ENE-WSW ao norte, NE-SW da Serra do Capivari Grande para o sul e finalmente de NNW-SSE na sua extensão mais meridional do Paraná. Conjuntos menores destacam-se como ramificações, ora paralelas, ora oblíquas ou perpendiculares a escarpa principal (serras da Prata, Igreja e Canavieiras).

De acordo com o IPARDES (1991, p. 41) a Serra do Mar “é mais escarpada do lado atlântico que do lado continental, dotada de taludes íngremes e vertentes acentuadas. Possui setores originados por erosão diferencial, sendo que, nas áreas onde as rochas são mais resistentes, as serras sobressaem centenas de metros do nível geral do planalto.”

Predominam nesta unidade as formas de relevo denudacionais, constituídas basicamente por escarpas e cristas com topos aguçados e convexos. Basicamente, essa unidade morfológica é constituída por gnaisses, migmatitos, micaxistos e granitos. O relevo é bastante dissecado e a drenagem apresenta um padrão dendrítico, adaptado às direções das estruturas que estão relacionadas com falhas, fraturas e contatos litológicos, que condicionam com frequência o padrão de drenagem em treliça com trechos com traçado retilíneo e incisões em ângulos agudos, mostrando a forte influência de direções estruturais importantes. Os topos das cristas são aplainados e nivelados, evidenciando restos da Superfície Sul-Americana e Pd3 (BIGARELLA *et al.*, 1965).

A Serra da Prata, integrada ao complexo da Serra do Mar, apresenta aspectos semelhantes quanto às características de relevo, muito acidentado, com grandes

desníveis e fortes declividades (geralmente superiores a 45%), sobretudo, nas porções mais elevadas. Observam-se a ocorrência de escarpas com taludes íngremes e vertentes que chegam a formar paredões rochosos em meio a vertentes côncavo-convexas. Essa ramificação da Serra do Mar se destaca em contraste à Planície Litorânea. (BLUM, 2006; GUIMARAES, 2007).

Angulo (1992, p. 32) ressalta que a Serra da Prata, não apresenta contato direto com o planalto, diferentemente da maior parte dos núcleos de serras altas, é também o único ponto em que a Serra do Mar alcança o mar, em seu extremo meridional, onde ela constitui a separação entre as bacias de Paranaguá e Guaratuba.

De acordo com Passos (2000, p. 190):

São identificados nas encostas da Serra da Prata, um relevo de esporões e blocos elevados associados a grandes superfícies de aplainamento, ocorrem ainda os níveis de pedimentos embutidos em largos alvéolos. Esses pedimentos são preservados em feições irregulares, dissecadas e escarpadas, constituindo terraços, ombreiras e patamares inferiores em parte recobertos por sedimentos de origem colúvio-aluvial, materiais estes que se espalham ao longo do piemonte e adentram a planície costeira em forma de cones de dejeção coalescentes em parte dissecados e preenchidos pelos aluviões atuais.

Ainda conforme Passos (*op. cit.*) a Serra da Prata apresenta, acima dos 500 m, superfície das escarpas intermediárias muito dissecadas e rebaixadas, escarpas intermediárias geralmente frontais a remanescentes dissecados, com frequência apresenta afloramentos rochosos e a partir da porção superior cicatrizes de deslizamentos recentes de pequena extensão, sendo relativamente comum na porção inferior, a concentração de matacões e tálus com depósitos colúvio-aluvionares. Acima dos 1000 m apresenta-se ligeiramente côncava na faixa em que se aproxima dos maciços elevados, sendo a área onde os elúvios tornam-se com frequência material fonte para origem dos solos atuais. Nas superfícies com altitudes superiores a 1200 m fazem-se presentes os afloramentos rochosos mesmo com declives pouco acentuados.

A Planície Litorânea divide-se em aluviais e de restinga. As primeiras foram originadas por depósitos de sedimentos de origem fluvial, quando grande parte da plataforma continental ficava emersa, sendo sulcada pelos rios, gerando um novo nível de base durante os períodos de mar baixo. As planícies de restinga formaram-se depois de uma transgressão marinha, quando o nível do mar começa a descer, possibilitando a

deposição de sedimentos junto à linha de costa, formando os cordões arenosos litorâneos. (OKA-FIORI; CANALI²⁹, 1998, p. 53-54; ANGULO³⁰, 1992 *apud* CANEPARO, 2000, p. 114–115).

Passos (2000, p. 67) acrescenta que a Planície Litorânea é constituída por formações pré-cambrianas recobertas por sedimentos continentais da formação Alexandra, de idade plio-pleistocênica, além dos recentes depósitos de taludes, terraços e rampas colúvio-aluvionares e marinhos quaternários, bem como aluviões e depósitos marinhos holocênicos.

Especificamente para a Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí A MINEROPAR (2011) elaborou mapeamento em que é possível observar a composição da geomorfologia local (FIGURA 22).

²⁹ OKA-FIORI, C.; CANALI, N. E. **Mapeamento geomorfológico**. In: *MEIO ambiente e desenvolvimento no litoral do Paraná: diagnóstico*. Curitiba: UFPR, 1998. p. 51-56.

³⁰ ANGULO, R. **Geologia da planície costeira do Estado do Paraná**. São Paulo, 1992. 334 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

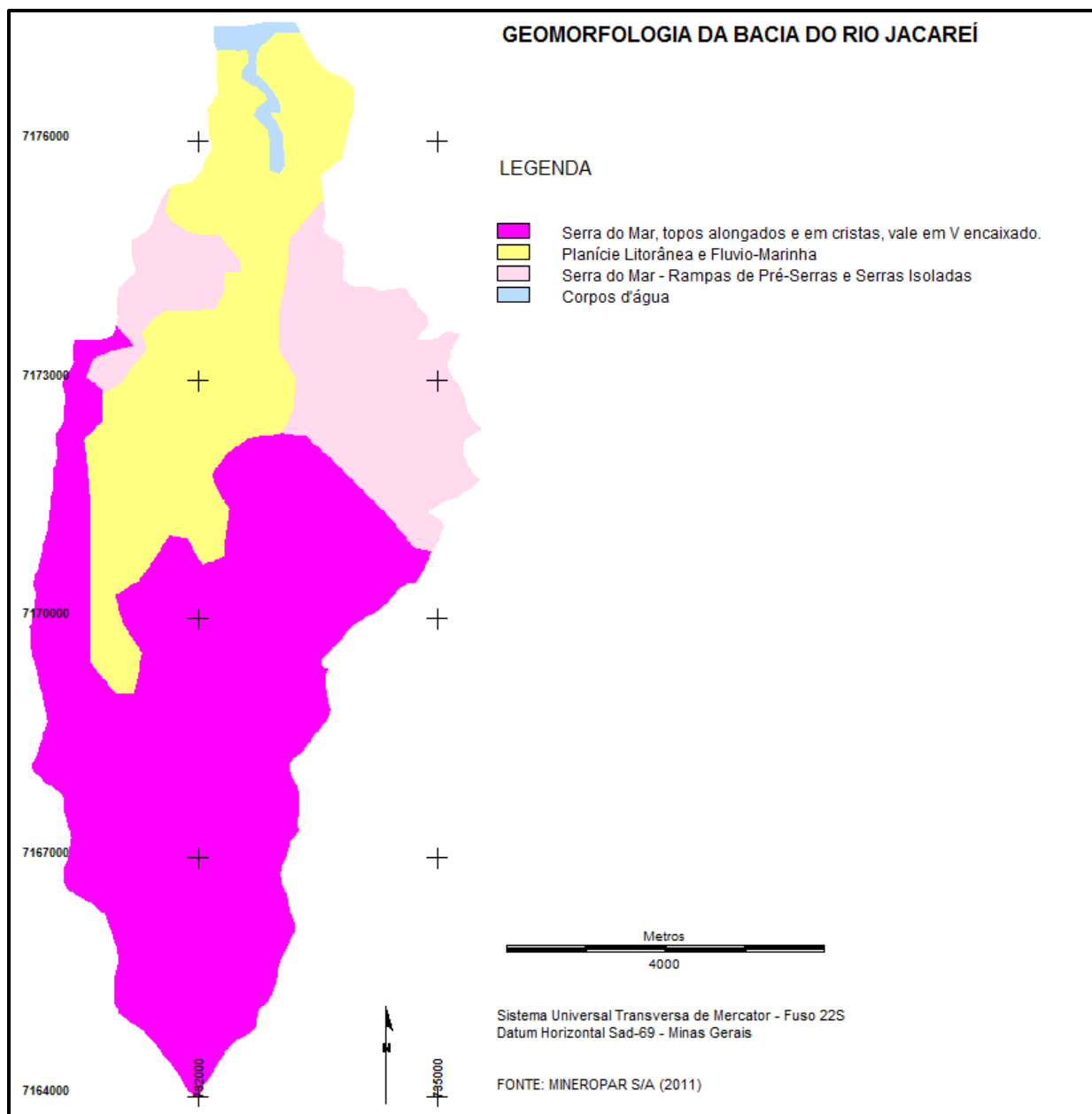


FIGURA 22 – Cartograma com a geomorfologia da Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré. FONTE: MINEROPAR S/A (2011). Org.: O autor (2014).

3.4 DRENAGEM

Muitos aspectos do ambiente podem ser compreendidos pela análise do sistema de drenagem uma vez que, os cursos d'água, também são responsáveis diretos pela esculturação da paisagem, no seu processo de desgaste, transporte e deposição de sedimentos, imprimindo fisionomias nas formas de relevo. As características geomorfológicas e, sobretudo a litologia que compõem o litoral

paranaense, condicionam os padrões das bacias hidrográficas locais. “A drenagem geralmente apresenta-se encaixada em vales de perfil transversal em forma de “V”. os perfis longitudinais apresentam numerosas quebras, mostrando diferenças resistências à erosão fluvial do substrato geológico.” (IPARDES, 1991, p. 46).

Para Bigarella *et al.* (1978, p. 24):

A drenagem oriental do Estado do Paraná abrange uma região fisiográfica de dois tipos de compartimentos distintos, isto é, aqueles da baixada litorânea e aqueles da Serra do Mar. Trata-se de um sistema hidrográfico formado de pequenas bacias limitadas a oeste pelas escarpas ou serras marginais, onde o relevo é bastante enérgico. A maioria dos rios têm suas nascentes distribuídas na encosta da serra e próximos aos topos, onde ocorre predomínio de escoamento retilíneo, devido a elevada declividade. Nas áreas de planície litorânea o padrão de escoamento torna-se meandrante.

As drenagens na Serra do Mar estão adaptadas às linhas de fraturamento dos blocos graníticos na direção NW-SE, conferindo a estas um aspecto retangular. Os vales são quase sempre profundos e estreitos, com vertentes muito íngremes e, por vezes, com paredões rochosos abruptos nas encostas situadas na escarpa principal (CORDANI; GIRARDI, 1967; STRUMINSKI, 200).

Na Serra da Prata, o sistema de drenagem inserido, tem aspectos semelhantes aos destacados anteriormente, esta unidade constitui um divisor separando águas que drenam para as baías de Paranaguá e Guaratuba.

Os canais de drenagem da bacia do Rio Jacareí são classificados pela MINEROPAR (2011, p. 29) como:

Fortemente entalhados, com vales em “V” encaixados, acompanhando estruturas de direção NE, muitas vezes os talvegues coincidem com diques de rochas básicas de menor resistência que as encaixantes. Apresentam elevada energia e tendem a concentrar água e volume de material, oriundo das posições mais elevadas, que são transportados em segmentos de vertentes com forma convergente de fluxo, que propiciam o caminho de corridas de detritos.

Ainda nesse contexto, Silveira *et al.* (2013, p. 627) destacam que a Bacia do Rio Jacareí:

Apresenta vale assimétrico, seu conjunto de vertentes mostra feições distintas nas duas margens tanto no alto como no médio curso da bacia. Na margem

direita, os divisores de água são constituídos pela Serra da Prata, onde ocorrem os maiores valores altimétricos da bacia, cuja elevação máxima é de 1421 metros acima do nível do mar, decrescendo até valores de 800m, enquanto que na margem esquerda a elevação máxima dos interflúvios é de 433m, decrescendo até valores de 200m.

É possível observar aspectos da drenagem da Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré no cartograma (FIGURA 23). Os canais fluviais foram digitalizados com base na Folha Topográfica Alexandra, SG.22-X-D-V/2-NO, escala 1:25.000, da Diretoria do Serviço Geográfico do Exército - DSG (1998) sendo, conforme a classificação de Strahler (1952), uma bacia com canais de até 5ª ordem e padrão de drenagem dendrítico. Quanto à forma, seguindo o procedimento de Lee e Salle (1970)³¹ *apud*. Christofolletti (1980), a bacia apresenta-se retangular alongada no sentido sul-norte, com exutório na Baía de Paranaguá, tal formato diminui a possibilidade de ocorrência de inundações.

O comprimento total dos cursos d'água da bacia é de 147,09 km, com área de 41,27 km² resulta em uma densidade de drenagem³² de 3,56 km/km². De acordo com Villela e Mattos (1975), a densidade de drenagem pode variar de 0,5 km/km² em bacias com drenagem pobre, a 3,5 km/km², ou mais, em bacias bem drenadas, indicando, portanto, que a bacia em estudo possui elevada densidade, porém com valores muito próximos aos limites de classificação. Embora com boa parte da cobertura vegetal original preservada, este resultado relaciona-se, sobretudo, com a litologia, os solos pouco permeáveis e também com as encostas declivosas, principalmente no terço superior e da bacia.

³¹ LEE, D. R.; SALLE, G. T. A method of measuring shape, *Geographical Review* (1970), 60 (4), pp. 555-563.

³² A densidade da drenagem correlaciona o comprimento total dos canais de escoamento com a área da bacia hidrográfica. Foi inicialmente definida por R. E. Horton (1945), podendo ser calculada pela equação

$$Dd = \frac{L_t}{A}$$

. Na qual Dd significa a densidade da drenagem; Lt é o comprimento total dos canais e A é a área da bacia. (CHRISTOFOLETTI, 1980).

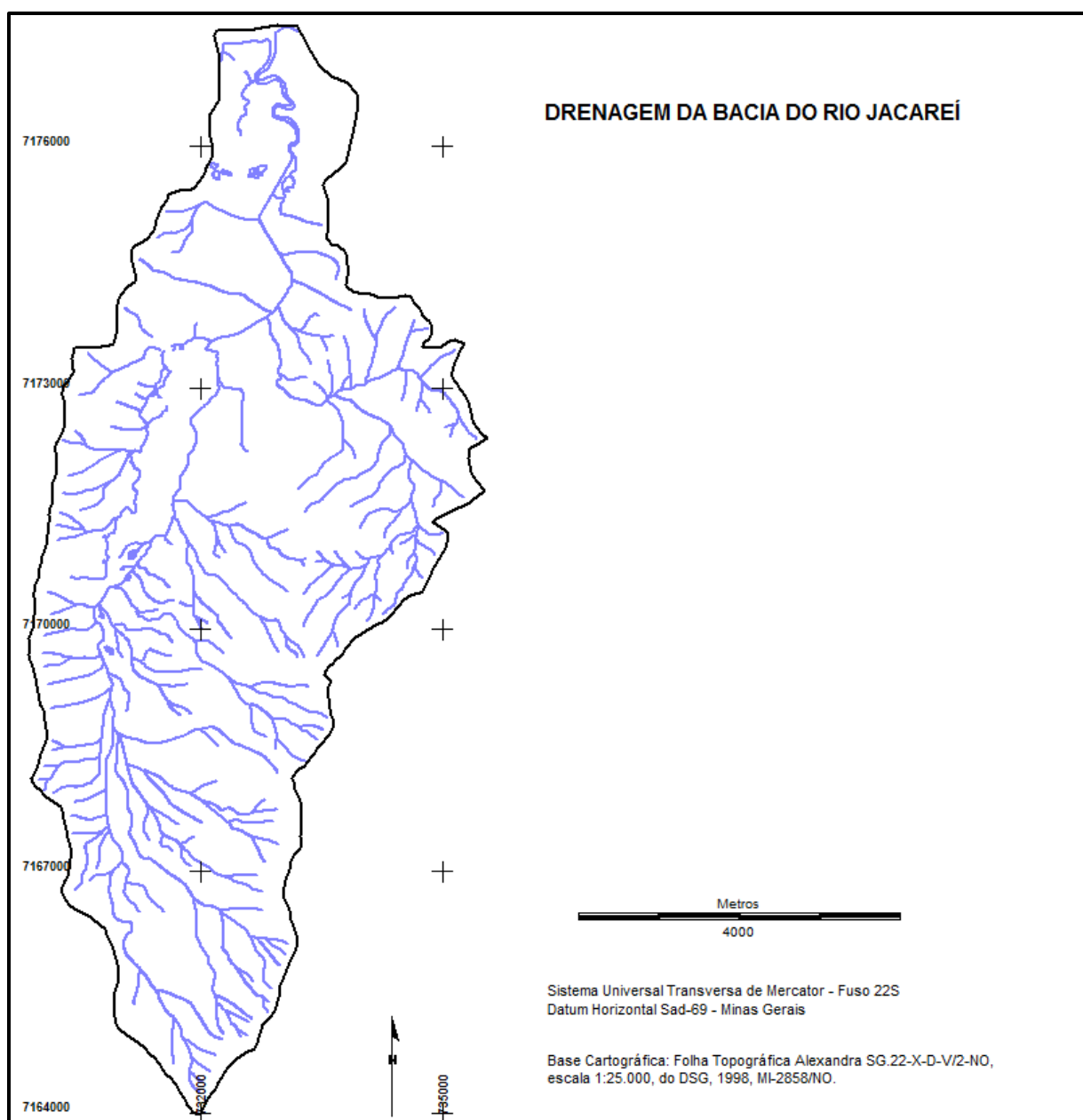


FIGURA 23 – Cartograma com a rede de drenagem da Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré. FONTE: Diretoria do Serviço Geográfico do Exército - DSG (1998). Org.: O autor (2014).

3.5 SOLOS

A distribuição dos solos está relacionada às condições físicas de determinada região, desse modo, as formas do relevo, a formação geológica, a cobertura vegetal e as condições climáticas determinam as características pedológicas.

Considerando os dois grandes compartimentos geomorfológicos: Planície Litorânea e Serra do Mar. A primeira se constitui de depósitos marinhos, continentais e

mistos e por morros isolados, desenvolvem-se os Espodossolos Humilúvicos – em sedimentos eólico-marinhos, os Gleissolos em sedimentos continentais e os Organossolos, em cotas geralmente inferiores a 50 metros. Em altimetrias superiores, com cotas de até 240m, podem ser encontrados Latossolos, Argissolos e Cambissolos derivados de rochas metamórficas – migmatitos, gnaisses ou xistos. No compartimento da Serra do Mar, nos seguimentos mais íngremes e elevados predominam os Afloramentos de Rochas, os Neossolos Litólicos e os Neossolos Regolíticos. (BHERING; SANTOS, 2008).

O IPARDES (1991) destaca que na região serrana há predomínio de morfogênese sobre a pedogênese, com isso os solos são rasos e pouco desenvolvidos, ocorrendo grandes áreas de afloramentos de rochas.

A Serra da Prata, onde se encontram os interflúvios à margem direita da Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí, apresenta em seus pisos superiores Neossolos Litólicos e Cambissolos rasos, sendo que os trechos intermediários e inferiores são caracterizados por Cambissolos mais profundos. (BLUM, 2006; CURCIO, 1992).

Baseando-se no mapa de solos do Estado do Paraná, elaborado por Bhering e Santos (2008), observou-se na bacia do Rio Jacareí a presença de:

- ✓ AR2 - Associação de AFLORAMENTOS DE ROCHA + NEOSSOLO LITÓLICO Hístico típico + CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico léptico, ambos de textura argilosa e álicos, com ocorrência nas partes mais elevadas da Serra da Prata.
- ✓ CXbd19 - Associação de CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico, álico, substrato migmatitos + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico latossólico, ambos textura argilosa, A moderado, ocorrência no curso médio, depósitos aluviais.
- ✓ PVAd27 - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico latossólico, textura argilosa, A moderado e álico, ocorrência nos terrenos planos e baixos, mais próximo a Baía.

Em estudo geotécnico na Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí a MINEROPAR (2011) considerou as seguintes classes de solos e associações: Gleissolos, associação Latossolos e Argissolos, associação Cambissolos e Argissolos, associação Cambissolos e Neossolos, Neossolos Litólicos, associação Neossolos e Afloramentos e Afloramentos Rochosos (FIGURA 24). O estudo constatou também que as unidades de

planície (planícies de inundação, terraços e rampas) constituem ambientes agradacionais, composto por solos de caráter hidromórfico.

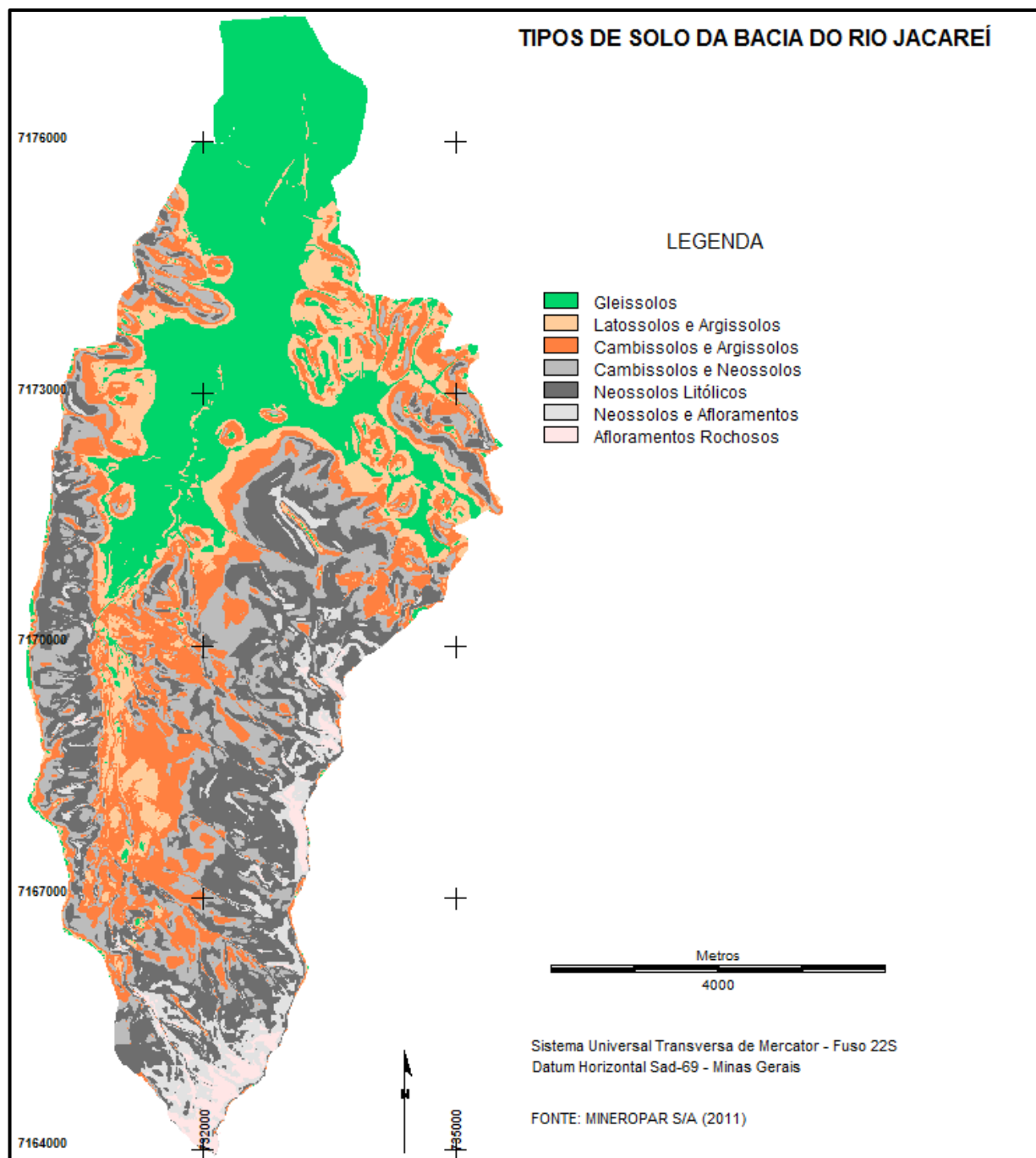


FIGURA 24 – Cartograma com os tipos de solo da Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí. FONTE: MINEROPAR S/A (2011). Org.: O autor (2014).

3.6 VEGETAÇÃO E USO DA TERRA

As vertentes orientais da Serra do Mar constituem o domínio da Floresta Ombrófila Densa ou Floresta Atlântica. A característica ecológica principal dessa formação é definida pelos fatores climáticos tropicais, isto é, temperaturas elevadas (média anual de 25° C) e precipitação alta bem distribuída ao longo do ano (menos de 60 dias secos). Nas planícies litorâneas em altitudes entre 5 a 50m, a fitofisionomia é caracterizada por uma vegetação que responde às condições do substrato, que se apresenta arenoso. (IBGE, 1992).

Segundo Veloso *et al.* (1991, p. 63), a Floresta Ombrófila Densa caracteriza-se por “árvores de grande porte, acompanhadas por lianas e epífitas em abundância, aspecto diferencial de outras classes de formação vegetacional. Ocorre em áreas de clima tropical bastante úmido, com precipitação elevada e bem distribuída ao longo do ano.”

No Estado do Paraná, a Floresta Ombrófila Densa desenvolve-se na região leste distribuída pela planície onde apresenta variações locais em face de fatores edáficos, projetando-se em direção à Serra do Mar em topossequências, onde a diferenciação entre espécies e o escalonamento arbóreo são determinados pelas diferenças microclimáticas e especialmente hídricas e edáficas, e que são fatores ecológicos bastante condicionados ao relevo local e regional. (PASSOS, 2000, p. 103).

A Floresta Ombrófila Densa, em função de suas diferentes fisionomias, foi subdivida por Veloso *et al.* (1991) e o IBGE (1992) em cinco formações, ordenadas de acordo com uma hierarquia topográfica, descritas a seguir, conforme a localização da área de estudo:

✓ **Formação Aluvial:** sem variação topográfica, formação ribeirinha que ocorre ao longo dos cursos de água ocupando os terraços antigos das planícies quaternárias. É constituída por macro, meso e microfanerófitos de rápido crescimento, em geral com casca lisa, tronco cônico, por vezes com a forma característica de botija e raízes tabulares. “Algumas espécies encontradas são: *Alchornea triplinervia* (tancheiro), *Brosimopsis lactescens* (leiteiro), *Ficus organensis* (figueira da folha miúda), *Talauma ovata* (bagaçu) *Pouteria venosa* (guacá de leite), entre outras.” (BIGARELLA *et al.* 1978, p. 57).

- ✓ **Formação das Terras Baixas:** 5 a 30m, quando situada entre 24º Lat. S e 32º Lat. S., ocupa em geral as planícies costeiras. Nesta formação dominam duas “ochlospécies”³³, sendo *Calophyllum brasiliense* (guanandi) a partir do Estado de São Paulo para o sul até a costa Centro-sul de Santa Catarina (VELOSO *et al.* 1991; IBGE, 1992).
- ✓ **Formação Submontana:** 30 a 400m, quando situada entre 24º Lat. S e 32º Lat. S. no Estado do Paraná, é encontrada nas partes mais baixas da Serra do Mar e no Vale do Ribeira, tem dossel³⁴ variando entre 25 e 30m. Essa formação apresenta uma grande variedade de espécies, citam-se: *Ocotea catharinensis* (canela preta), *Pseudopiptadenia warmingii*, *Aspidosperma pyricollum*, *Aspidosperma camporuma*, *Sloanea guianensis* (laranja do mato), *Pterocarpus violaceus* (sangueiro), *Inga Sessilis* (ingá macaco), *Euterpe edulis* (palmito), *Alchornea triplinervia*, *Calyptranthes lucida*, *Brosimum lactescens*, *Pterocarpus violaceus*, *Hieronyma alchorneoides*, *Virola bicuhyba*, *Cedrela fissilis*, *Cabralea canjeran* e *Ficus luschnatiana*.
- ✓ **Formação Montana:** 400 a 1000m, entre 24º Lat. S e 32º Lat. S., distribui-se nas faixas intermediárias das vertentes da Serra do Mar paranaense, com dossel uniforme e variando entre os 20m. Algumas das espécies mais comuns dessa unidade são: *Ocotea catharinensis*, *O. odorifera*, *O. corymbosa* e *Cryptocarya aschersoniana*, *Aspidosperma pyricollum*, nos estratos superiores e *Pouteria torta*, *Cabralea canjerana*, *Sloanea lasiocoma* e *Guapira opposita* no extrato inferior.
- ✓ **Formação Altomontana:** Situa-se acima dos limites da formação anterior (acima de 1000 a 1200m), são espécies de tamanhos reduzidos, geralmente retorcidas, de caráter xerófilas, adaptadas aos solos rasos (Neossolos Litólicos e Organossolos não-saturados), ventos fortes e constantes, elevada nebulosidade, intensa radiação luminosa. As espécies típicas dessa unidade são: *Clusia criuva* (mangue-do-mato), o *Podocarpus sellowii* (pinho-bravo), *Erythroxylum cuspidifolium* (cocão), *Symplocos celastrina* (orelha-de-onça), *Vriesia spp.* (bromélias), *Gleichenia* e *Polystichum spp.*

³³ Espécie que apresenta ampla distribuição geográfica, e que exhibe ao longo de sua área de ocorrência uma uniformidade morfológica relativamente grande (IBGE, 2004).

³⁴ Estrato mais alto das árvores de uma floresta (IBGE, 2004).

(pteridófitas), *gramíneas* (*Panicum*), *Ilex microdonta*, *Siphoneugena reitzii*, *Weinmannia humilis*, *Podocarpus sellowii*, *Clethra uleana*, *Tabebuia catarinensis* e *Drimys brasiliensis*, entre outras. (MAACK, 1968; BIGARELLA *et al.*, 1978; RODERJAN; KUNIYOSHI, 1988; VELOSO *et. al.*, 1991; IBGE, 1992; BLUM, 2006; MINEROPAR, 2011).

A bacia do Rio Jacareí é recoberta pelas formações descritas, incluindo a Formação Altomontana, nas maiores elevações da Serra da Prata. Destacam-se ainda, as presenças da restinga e dos manguezais na Planície Litorânea.

A restinga é coberta por vegetação arbórea de caráter sub-xerófito, composta por mirtáceas, lauráceas, euforbiáceas, melastomataceas, pteridófitas, bromeliáceas, epífitas, orquídeas, liliáceas, lianas e palmáceas. Entre os arbustos e árvores destacam-se: *Lantana undulata* (cambará), *Temstroemia brasiliensis* (manjrovoca), *Clusia criuva* (mangue bravo), *Schinus sp.* (aroeira), *Ilex microdonta* (cauna), *Pithecollobium lusorium* (timbouva), *Tabebuia cassinoides* (caxeta). A vegetação do manguezal é constituída por *Rhizophora*, *mangle*, *Laguncularia racemosa* e *Avicennia tomentosa*. Como elemento de transição para a restinga ou mato ocorre *Hibiscus tiliaceus*. (BIGARELLA *et al.*, 1978, p. 57).

Em relação ao uso da terra, a bacia tem parte de sua extensão inserida no Parque Nacional Saint Hilaire/Lange (PNSHL). Os principais cursos d'água, Rio São Francisco, Tingidor e o próprio Jacareí, têm suas nascentes na porção ocidental da Serra da Prata, que por sua vez, está integralmente dentro do parque. Entretanto, o baixo curso da bacia hidrográfica, área de planície formada por depósitos aluvio-coluvionares, encontra-se fora da Unidade de Conservação.

O Parque Nacional Sant Hilaire/Lange foi criado, conforme Lei Federal nº 10.227 de 23 de maio de 2001, com a finalidade de “proteger e conservar ecossistemas da Mata Atlântica e assegurar a estabilidade ambiental dos balneários sob sua influência, bem como a qualidade de vida das populações litorâneas. Inicialmente o Parque contava com 25.000 ha, sendo ampliado em 2003 para 35.888 há.” (CANEPARO; GUIMARAES, 2007).

A imagem orbital (FIGURA 25) destaca o polígono com os limites do Parque Nacional Sant Hilaire/Lange, que coincide com o maciço da Serra da Prata. A parte baixa da bacia, planície de inundação, área externa ao Parque, nas proximidades da BR-277 e da Baía de Paranaguá está indicada com a seta.

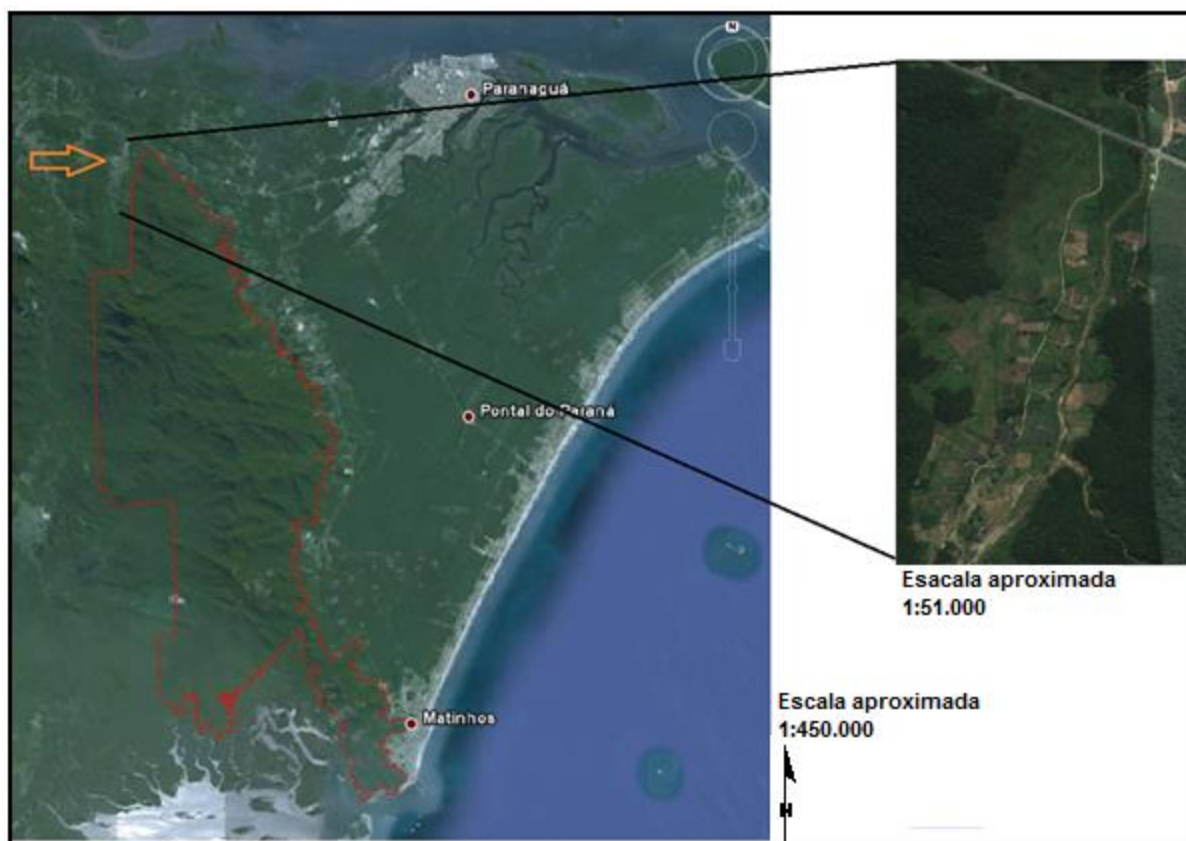


FIGURA 25 - Imagem orbital com limites do Parque Nacional Sant Hilaire/Lange (polígono em vermelho), Serra da Prata e áreas contíguas, dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré. Planície de inundação indicada com a seta e ampliada para melhor observação. FONTE: Parna Saint Hilaire/Lange (*wordpress*), visualização: *software Google Earth*. Adaptado pelo autor (2013).

Como boa parte da bacia está inserida em uma Unidade de Conservação de Proteção Integral, o uso da terra nessa porção é reduzido, as encostas permanecem cobertas pela vegetação da Floresta Ombrófila Densa, em diversas fases sucessionais, sendo um dos trechos mais bem conservados de Mata Atlântica do país. De acordo com Siedlecki; Portes; Cielo Filho (2003)

No início das encostas, ocorre a Floresta Ombrófila Densa Submontana, sendo composta, na sua maioria, por vegetação primária alterada pela retirada seletiva de madeira, e por capoeiras, capoeirões e florestas secundárias. A Floresta Ombrófila Densa Montana encontra-se relativamente bem preservada, representada por vegetação primária alterada, mas, também, por floresta primária e secundária. A Floresta Ombrófila Densa Altomontana é quase que exclusivamente primária, e encontra-se preservada, em função da dificuldade de se alcançar grandes altitudes. Especificamente no distrito de Floresta a pressão antrópica é praticamente irrelevante, excetuando-se alguns poucos

sítios e chácaras de lazer. Toda extensão da borda ocidental do parque, apresenta um alto potencial ecoturístico devido sua beleza cênica.

Observou-se em campo a existência de pequenas propriedades rurais voltadas principalmente à produção de subsistência, com cultivos variados, embora algumas culturas tenham finalidade comercial, com destaque para banana e mandioca, essas, muitas vezes, ocupando áreas relativamente íngremes das encostas, utilizando-se de processo rudimentar de plantio.

Nas áreas planas, situadas as margens do rio Jacaré, principalmente à margem esquerda, fora do Parque Nacional Saint Hilaire/Lange, constatou-se também o cultivo de hortaliças (FIGURA 26), pastagens e campo, além de áreas de reflorestamento nas proximidades de BR-277, mapeadas pela MINEROPAR (2011) e observadas *in loco*.

Diante deste panorama, observou-se que a ocupação na bacia hidrográfica é relativamente pequena, com reduzido número de habitantes, residências e com considerável área preservada de mata original. Sendo assim, subentende-se que as interferências antrópicas não refletem diretamente em maiores mudanças no meio natural que incidem, por si só, em grande potencial de instabilidade das encostas, entretanto, a fragilidade do ambiente local aos processos em análise, representa possíveis consequências negativas à população e mesmo com influência reduzida, medidas preventivas e controladas de uso e ocupação da terra são bem vindas.



FIGURA 26 - Pequena propriedade agrícola com cultivo de hortaliças na margem esquerda do Rio Jacareí. A área de cultivo desenvolve-se sobre materiais depositados em forma de leque e retrabalhados pela ação pluvial e fluvial após a deposição do leque de sedimentação resultante de corridas de lama ocorridas em 2011 e que recobriu a planície de inundação. Ao fundo observam-se cicatrizes na encosta resultantes dos eventos de 2011, portanto, área fonte de parte destes sedimentos. FONTE: O autor (2013).

A FIGURA 27 apresenta o cartograma de uso, ocupação da terra e cobertura vegetal da Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí, elaborado e fornecido pela MINEROPAR (2011), representando as diferentes categorias, de acordo com a presença humana.

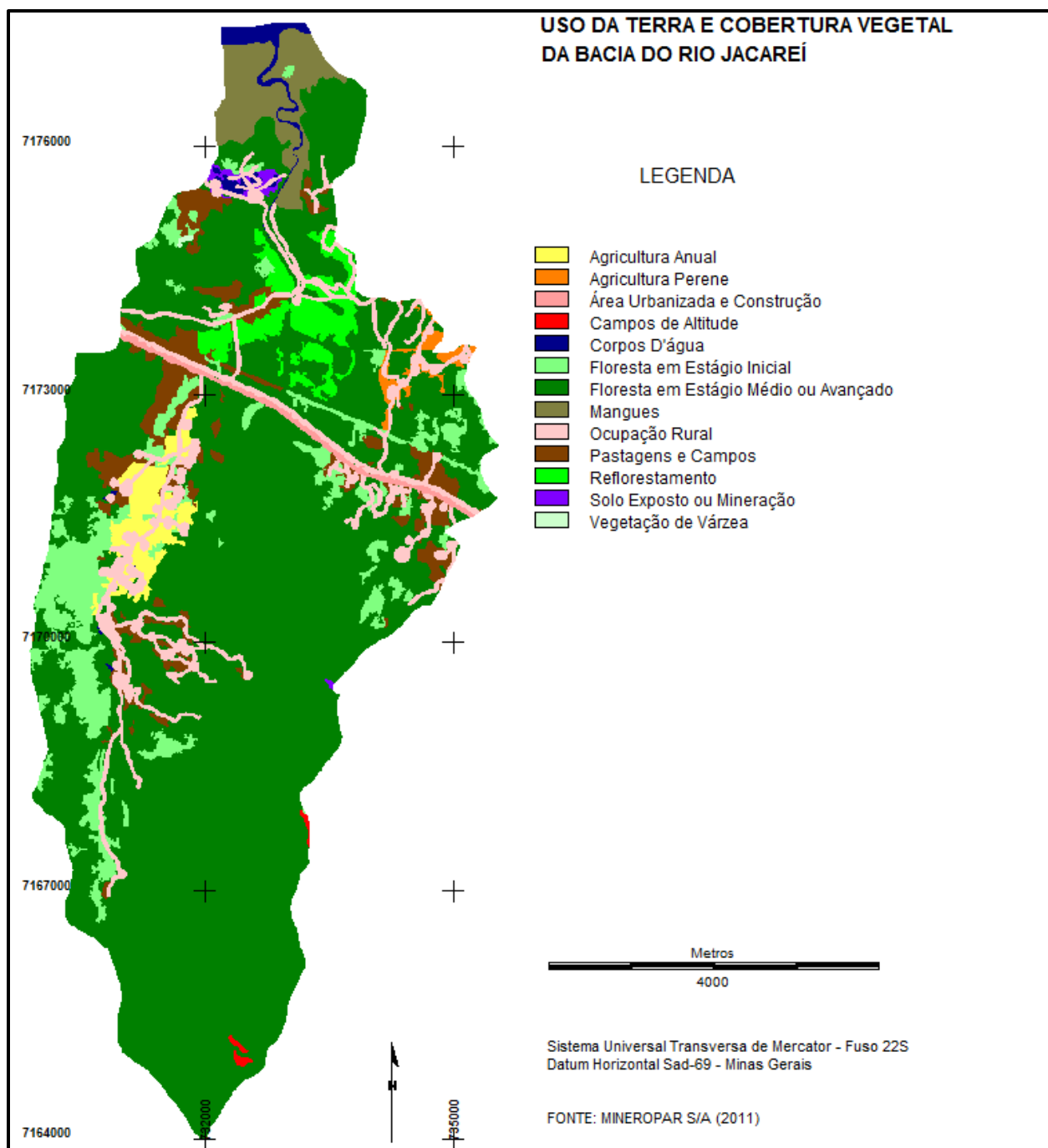


FIGURA 27 – Cartograma de uso da terra e cobertura vegetal da Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí.
FONTE: MINEROPAR S/A (2011). Org.: O autor (2014).

4. MATERIAL E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo, apresenta-se inicialmente, a relação do material disponibilizado e utilizado para o desenvolvimento do trabalho. Posteriormente são descritos os procedimentos adotados para sua consecução.

4.1 MATERIAL

O material utilizado se constitui basicamente num conjunto de dados e informações composta por: base cartográfica, formada por Planos de Informação (PI's) das características físico-naturais e de uso da terra (quantitativos e qualitativos) da área de estudo; imagens de satélites; fotografias aéreas; consulta à referencial teórico específico, composto de obras clássicas, reconhecidas nacionalmente e pesquisas mais recentes, artigos, dissertações e teses referentes à temática; softwares de geoprocessamento, especificamente o IDRISI TAIGA e o CartaLinx³⁵ desenvolvidos pela *CLARK LABS* e equipamentos como GPS e câmera fotográfica para auxiliar na aquisição de informações em levantamentos e avaliações de campo.

4.1.1 Referencial Específico

Para o desenvolvimento da pesquisa e principalmente atribuição de parâmetros de suscetibilidade aos condicionantes de instabilidade das vertentes adotados, foi consultado referencial bibliográfico específico que compartilha conceitos com o referido estudo. Além das diversas obras que abordam o tema de forma geral, destaca-se a relevante contribuição das informações disponibilizadas pela MINEROPAR (2011) por meio do Mapeamento Geológico-Geotécnico da Porção Leste da Serra do Mar do Estado do Paraná, realizado justamente em função das catastróficas consequências socioeconômicas decorridas dos movimentos de massa e inundações de março de 2011.

³⁵ Licenciados e utilizados pelo Laboratório de Processamento Digital de Imagem (LAPIGEO) e Laboratório de Processamento e Estudos Ambientais (LAGEAMB) do Departamento de Geografia, da Universidade Federal do Paraná.

Com método baseado na análise da morfologia do relevo, utilização de atributos topográficos como variáveis consideradas condicionantes (hipsometria, declividade, plano de curvatura das vertentes e o índice topográfico de umidade) e uso dos Sistemas de Informações Geográficas para a aplicação da técnica de álgebra de mapas, o relatório da MINEROPAR (*op. cit.*) apontou as áreas suscetíveis e de risco da região litorânea paranaense, representada por meio de mapeamento que pôde ser utilizado como base de consulta e comparação desta pesquisa.

4.1.2 Base de dados cartográficos

- ✓ Folha topográfica Alexandra, SG.22-X-D-V/2-NO, escala 1:25.000, com equidistância das curvas de nível de 10 metros, da Diretoria do Serviço Geográfico do Exército - DSG (1998);
- ✓ Mapa compilado de solos cedido pela MINEROPAR S/A (2011) em formato *shapefile*, sistema UTM, datum Sad 69, gerado a partir do Mapa de Solos do Estado do Paraná IAPAR/EMBRAPA (2008);
- ✓ Mapa compilado de uso da terra e cobertura vegetal em formato *shapefile*, sistema UTM, datum Sad 69, produzido a partir das imagens SPOT dos anos de 2005 e 2006 pelo ITCG e PARANACIDADE (inédito), atualizado com base na imagem LANDSAT5, fornecido pela MINEROPAR S/A (2011);
- ✓ Mapa compilado de classes litológicas fornecido pela MINEROPAR S/A (2011), em formato *shapefile* sistema UTM, datum Sad 69, gerado a partir do Mapeamento Geológico do Estado do Paraná;
- ✓ Imagem de satélite WorldView1 banda pancromática, com resolução espacial de 0,5 metros, gerada em maio de 2011, fornecida pela Minérios do Paraná S/A - MINEROPAR (2011);
- ✓ Imagens orbitais do *software Google Earth*;
- ✓ Inventário com mapeamento das cicatrizes dos movimentos de massa ocorridos em março de 2011 na Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí, baseado na imagem de satélite WorldView1, fornecido por Silveira *et al.* (2013);

- ✓ Índices Pluviométricos das estações instaladas no Litoral paranaense fornecido pelo Instituto Tecnológico SIMEPAR e Instituto das Águas do Paraná (Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná – SEMA).

4.1.3 Softwares e equipamentos

- ✓ Microcomputador e equipamentos periféricos;
- ✓ *Software* IDRISI TAIGA, desenvolvido pela CLARK LABS (2009), que possui módulos de modelagem para geração dos Planos de Informação (PI's) temáticos aplicados à análise espacial;
- ✓ *Software* CartaLinux, desenvolvido pela CLARK LABS (2006), utilizado para digitalização e edição dos Planos de Informação (PI's);
- ✓ *Software* ArcGIS 10, extensão *Spatial Analyst*, utilizado para interpolação de dados pluviométricos;
- ✓ Câmera digital, utilizada para tomadas fotográficas no trabalho de campo.

4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O estudo sustenta-se no pensamento sistêmico, baseando-se em análise do comportamento dinâmico da paisagem, avaliando diversos elementos, físicos e socioeconômicos, integrados e correlacionados. Tem como unidade de área, a bacia hidrográfica e componentes constituintes que estabelecem relações mútuas, trata-se de um sistema aberto, que no desenvolvimento recebe energia das forças climáticas e tectônicas e libera energia por meio do fluxo de água, mobilização e transformação de materiais (sedimentos, solos, etc.) além de estar submetido a ações antrópicas que também integram este sistema.

Como norteador do processo de construção e operacionalização do trabalho foi utilizada a proposta metodológica de Libault (1971), a qual envolve os quatro níveis da pesquisa geográfica, fundamentada no tratamento quantitativo da informação, com aplicação em dados numéricos, passíveis de representação cartográfica, por meio de

mapas-síntese, que representam visualmente o produto da pesquisa. Os níveis da pesquisa definidos pelo autor como: compilatório, correlatório, semântico e normativo.

Libault (1971, p. 32) propõe que o nível **compilatório** corresponde à primeira fase da pesquisa, em que se dá o levantamento dos dados, bem como a compilação destes; o nível **correlatório** é o momento de correlação dos dados e aprimoramento das informações; o nível **semântico** refere-se à interpretação e análise dos resultados obtidos nos níveis anteriores; e o nível **normativo** que é a etapa final do trabalho, na qual o produto da pesquisa é transformado em modelo, representado por meio de mapas-síntese ou outras formas de representações que demonstram de forma mais acessível o produto final da pesquisa. Libault (*op. cit.*) destaca ainda que o nível normativo, não se refere apenas ao estabelecimento de modelos de representação do produto de pesquisa, mas à normatização da aplicação dos resultados da pesquisa elaborada.

Em conjunto com a proposta elaborada por Libault (1971), que sistematiza e organiza as etapas do processo adotado na pesquisa, a agregação e combinação dos fatores condicionantes aos movimentos de massa para geração dos modelos de suscetibilidade sínteses foi efetuada a partir do método de Avaliação Multicritério pelas técnicas: Combinação Linear Ponderada (WLC) e Média Ponderada Ordenada (OWA). Todo o procedimento utilizou-se do Sistema de Informações Geográficas como suporte de operação e será detalhado nos capítulos seguintes. Para o melhor entendimento do procedimento adotado foi elaborado o fluxograma (FIGURA 28), onde todas as etapas podem ser verificadas de forma sintética.

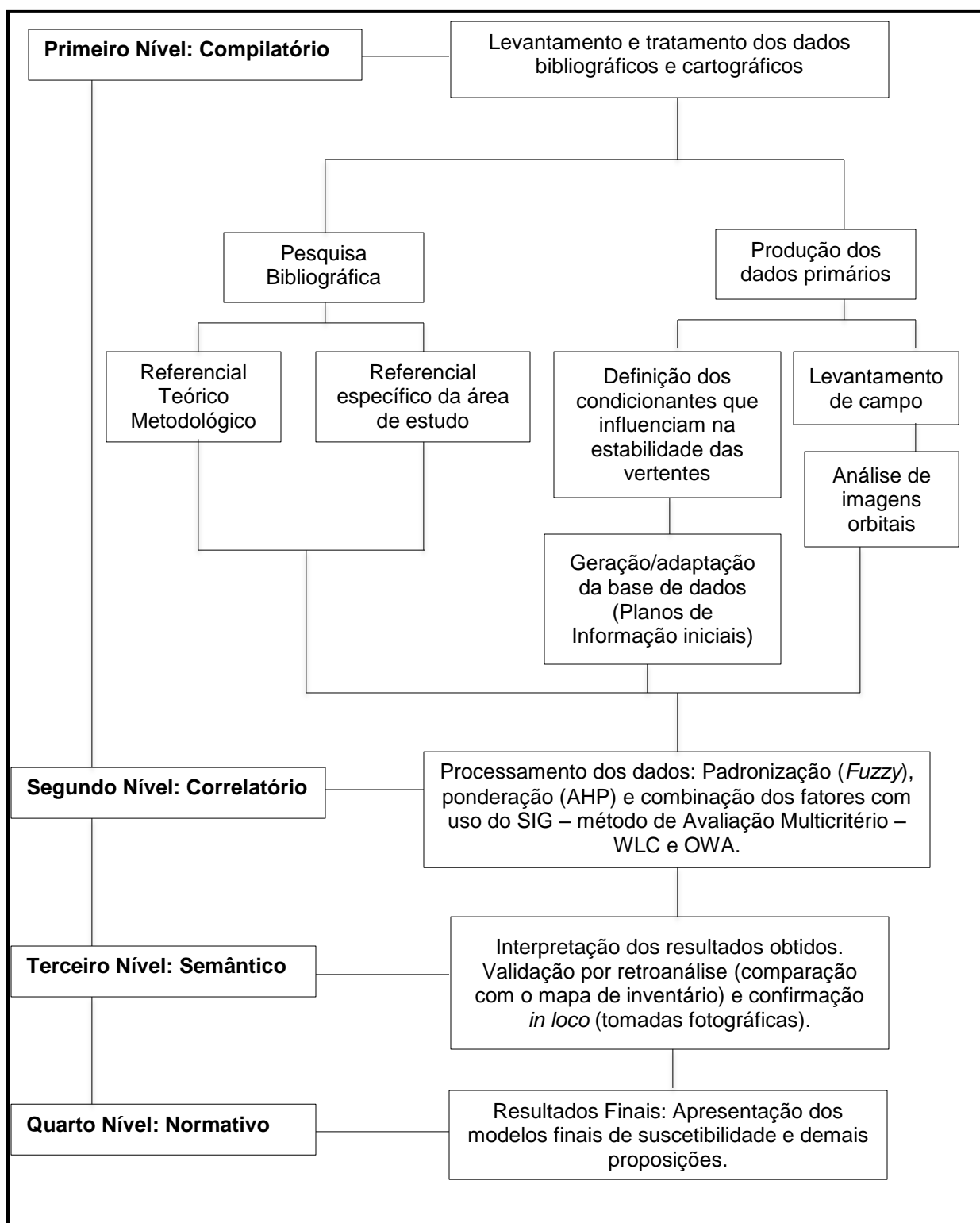


FIGURA 28 - Fluxograma com a síntese das etapas da pesquisa. FONTE: Libault (1971). Org.: O autor (2013).

4.2.1 Seleção da área de estudo

A escolha da área de estudo, se deu em função da magnitude e poder destrutivo dos movimentos de massa ocorridos no dia 11 de março de 2011, o maior evento dessa natureza registrado desde a ocupação do litoral paranaense. Na ocasião, um conjunto simultâneo de processos combinados envolveram: queda ou desprendimento e rolamento de blocos, escorregamentos de terra, corridas de lama e detritos, que associados a inundações, causaram grandes prejuízos socioeconômicos e ambientais para a comunidade local e prejudicaram a circulação regional, justificando o interesse científico pelo reconhecimento dos processos ocorridos e desenvolvimento de uma modelagem de mapeamento e análise da suscetibilidade da área.

As características naturais, com a presença da Floresta Ombrófila Densa, formas de relevo com altitudes significativas que implicam em elevadas declividades, solos rasos e afloramentos rochosos nas partes superiores das encostas, altos índices pluviométricos anuais, principalmente no verão, entre outras condições, demonstram a fragilidade da área de estudo para processos erosivos superficiais e de movimentos coletivos, qualificando-a como modelo interessante de análise, com possibilidade de adaptação e uso em outros estudos de caso.

Considerou-se também a disponibilidade de dados, como bases topográficas em escala de detalhe 1:25.000, mapas geológicos, geomorfológicos, de vegetação, de solo, de uso e ocupação da terra, fotografias aéreas e imagens de satélite anterior e posterior ao evento.

Destaca-se ainda a beleza cênica da região, com grande potencial turístico que concentra um dos últimos refúgios de Mata Atlântica, favorecendo a manutenção de espécies de fauna e flora ameaçadas de extinção e que demonstra ser uma área de grande fragilidade ambiental, uma vez que apresentam declives acentuados, topos de morros com inúmeras nascentes, planície com presença de restinga e mangue, portanto, unidades protegidas pela legislação ambiental.

4.2.2 Determinação dos condicionantes

Referindo-se às variáveis utilizadas como condicionantes de instabilidade das vertentes, em consulta específica a pesquisas nacionais e internacionais realizadas nos últimos anos, constatou-se que os respectivos autores, com enfoques temáticos diversos, geralmente utilizam como fatores relevantes e, portanto, de influência direta na predisposição dos terrenos aos processos de movimentos de massa sob ação da gravidade, na **geomorfologia**: declividade, altitude, unidades geomorfológicas, forma e orientação das vertentes; na **geologia**: unidades geológicas, litologia, descontinuidades e estrutura (falhas, fraturas, lineamentos, etc.); na **pedologia**: tipos de solo; aspectos **fitogeográficos**: cobertura vegetal e **antrópicos**: ocupação e uso da terra, áreas agrícolas e abertura de estradas. Os fatores associados ao **clima**, sobretudo a pluviosidade é considerada como um agente desencadeante responsável pela deflagração dos processos. (ARAÚJO, 2004; BISPO *et al.*, 2011; CHAUHAN *et al.*, 2010; ERCANOGLU; GOKCEOGLU, 2004; ERMINI *et al.*, 2005; FRANCISCO, 1996; KOMAC, 2006; LEE *et al.*, 2004; MOREIRA, 2008; PHI; BAC, 2004; ZÊZERE, 2005; PRADHAN *et al.*, 2006; VANACOR, 2006; ZAIDAN, 2006, entre outros).

Os condicionantes descritos não foram utilizados como critérios de maneira homogênea no universo dos estudos consultados, alguns são mais explorados em detrimento de outros, conforme algumas peculiaridades e objetivos das pesquisas.

Para selecionar os condicionantes e incluí-los nas análises deste estudo, foram consideradas ainda as características da área de estudo, tanto físicas como socioeconômicas e procurando diminuir a subjetividade no processo de escolha, além de considerar os preceitos estabelecidos e destacados no referencial teórico, elaborou-se uma tabela de variáveis definidas por diferentes autores relacionados à temática que se propuseram a gerar e analisar cenários de suscetibilidade, perigo, vulnerabilidade e risco associados aos movimentos de massa utilizando-se dos Sistemas de Informações Geográficas. As experiências são apresentadas na TABELA 2. Em seguida, no QUADRO 3 são relacionados 36 autores e os respectivos anos de publicação dos trabalhos.

TABELA 2 - CONDICIONANTES FÍSICOS E ANTRÓPICOS UTILIZADOS PARA ESTIMAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE E RISCO A MOVIMENTOS DE MASSA.

Condicionantes Considerados																																					Total	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
Geológicos																																						27
1-Litologia																																						19
2-Estrutura (falhas, fraturas, lineamentos etc.)																																						10
3-Unidades geológicas																																						6
4-Descontinuidades																																						2
Climáticos:																																						5
5-Pluviosidade																																						5
Pedológicos:																																						15
6-Tipo de solo																																						15
Geomorfológicos:																																						35
7-Declividade																																						33
8-Forma da vertente																																						20
9-Altitude																																						17
10-Área de drenagem																																						9
11-Orientação																																						14
12-Unidades geomorfológicas																																						12
13-Densidade de drenagem																																						5
14-Rugosidade do terreno																																						1
Cobertura vegetal e uso da Terra																																						31
15-Cobertura vegetal																																						19
16-Uso da terra																																						17
17- Estradas																																						11
18-Ocupação																																						8
19-Áreas agrícolas																																						3

Org.: O autor (2013).

1	Zaidan (2006)	10	Chauhan <i>et al.</i> (2010)	19	Pradhan <i>et al.</i> (2006)	28	Miara e Oka-Fiori (2007)
2	Marcelino (2004)	11	Crepani e Medeiros (2001)	20	Soares <i>et al.</i> (2002)	29	Barnetche e Moretti (2004)
3	Lee <i>et al.</i> (2004)	12	Araújo (2004)	21	Lima e Souza (2008)	30	Dias e Herrmann (2002)
4	Ercanoglu e Gokceoglu (2004)	13	Silva <i>et al.</i> (2011)	22	Martini <i>et al.</i> (2006)	31	Moreira (2008)
5	Francisco (1996)	14	Bandeira <i>et al.</i> (2004)	23	Vieira (2007)	32	Ayalew e Yamagishi (2005)
6	Zêzere <i>et al.</i> (2005)	15	Girão (2007)	24	Reimer (2006)	33	Komac (2006)
7	Vanacôr (2006)	16	Cardozo e Herrmann (2011)	25	Viera <i>et al.</i> (2005)	34	Souza (2004)
8	Phi e Bac (2004)	17	Varanda (2006)	26	Ermini <i>et al.</i> (2005)	35	Coe <i>et al.</i> (2004)
9	Silva (2008)	18	Moura <i>et al.</i> (2006)	27	Bispo <i>et al.</i> (2011)	36	Schaefer (2012)

QUADRO 3 - LISTA DE AUTORES UTILIZADOS PARA ELABORAÇÃO DA TABELA DE CONDICIONANTES DOS MOVIMENTOS DE MASSA.

Org.: O autor (2013).

Nas pesquisas consultadas, constatou-se certa semelhança entre os parâmetros de instabilidade das vertentes definidos para os condicionantes selecionados, indicados como de maior suscetibilidade para ocorrência de processos com movimentos de massa. Entretanto, fatores como: unidades geomorfológicas, estrutura geológica e orientação das vertentes, por apresentarem peculiaridades em cada estudo de caso, foram adotados parâmetros específicos. A pluviosidade, por ser um agente classificado como principal fator desencadeante dos processos não está integrado diretamente aos demais fatores quando se tem como objetivo a elaboração de cartas de suscetibilidade, embora tenha sido considerado em cinco trabalhos consultados.

Ressalta-se ainda, que considerável quantidade dos trabalhos consultados, 18 pesquisas, ou 50% do total, com objetivo de geração de mapeamentos de suscetibilidade e/ou risco, utilizaram como base o mapa de inventário, com registros de eventos pretéritos para que, a partir dessas informações, se estabeleçam correlações entre as diferentes categorias ambientais e a localização das cicatrizes identificadas e mapeadas, permitindo a atribuição de parâmetros com menos subjetividade, porém estes ficam limitados à modelagem para áreas que disponibilizam de registros históricos

(imagens orbitais, fotografias aéreas, etc.), dificultando sua aplicação em terrenos desprovidos de tais informações.

Outra dificuldade para o uso de inventários se refere ao recobrimento da vegetação em áreas descampadas por escorregamentos que dificultaria a identificação das cicatrizes em campo ou a partir de imagens orbitais e também a escala apropriada do banco de dados de entrada que muitas vezes não se dispõe.

De modo geral, constatou-se no universo dos trabalhos analisados que os aspectos geomorfológicos como a declividade, forma das vertentes e altitudes são frequentemente utilizados e considerados imprescindíveis. O comparativo efetuado entre os estudos indicou que as declividades entre 30 e 45% e acima desse ângulo, apresentam maiores níveis de instabilidade. Referindo-se as formas das vertentes, observou-se que as vertentes côncavas são mais suscetíveis, seguidas pelas retilíneas e convexas. Para as altitudes, as pesquisas demonstraram que a partir dos 200m em função dos estudos de caso localizarem-se, principalmente nas áreas serranas, são evidenciados níveis maiores de instabilidade das encostas, embora tenha ocorrido variação considerável nos parâmetros deste condicionante, de acordo com as características geomorfológicas de cada estudo de caso.

Quanto a litologia, outro condicionante considerado indispensável, há registros de maior incidência dos processos nas formações magmáticas e metamórficas, Entretanto, de acordo com o referencial de fragilidade ambiental consultado, as rochas sedimentares apresentam menor resistência à denudação e conseqüentemente aos movimentos de massa. (ROSS, 1991, 1994 e 2000; CPRM, 2003; Crepani *et al.* 2001; Silveira, 2005). Este panorama está relacionado possivelmente, às áreas onde se concentram os estudos de caso, encostas compostas principalmente por formações rochosas magmáticas e metamórficas.

Com relação à estrutura geológica, tanto a literatura clássica, como as pesquisas específicas evidenciaram associação entre falhas e fraturas com e os movimentos de massa, porém sem aferições confiáveis ou mesmo experimentais sobre distâncias limites entre tais estruturas e as ocorrências dos fenômenos. Por este motivo, optou-se pela não inclusão deste fator na análise, visando evitar possíveis inconsistências na modelagem.

Referindo-se às distâncias dos cursos d'água foi confirmado, principalmente em pesquisas que utilizam de mapa de inventário, que existe correlação direta entre as zonas de origem e deslocamento de material e os rios. Observou-se que em uma distância de até 200m dos rios é maior a instabilidade das vertentes do que em distâncias maiores e processos de movimentos de massa são mais frequentes, sobretudo, em até 100m de distância dos canais de drenagem.

Quanto às classes de solo, outro condicionante indispensável para avaliar a instabilidade das vertentes, verificou-se que este invariavelmente está associado a outros fatores. Nas pesquisas consultadas, os Cambissolos e Argissolos foram classificados como os que apresentam maior propensão a ocorrência dos processos. Para os condicionantes, cobertura vegetal e uso da terra constatou-se que áreas com solos expostos, loteamentos urbanos e pastagens indicam maiores níveis de instabilidade. As informações relatadas foram sistematizadas na TABELA 3.

Diante das observações descritas foram selecionados os seguintes condicionantes a serem combinados e integrados em ambiente SIG: declividade, forma das vertentes, altitude, litologia, tipos de solo, distância dos rios, uso da terra e cobertura vegetal, entendendo que estes são essenciais e satisfazem os objetivos propostos.

Para efeito desta análise, os condicionantes são considerados critérios, são combinados de modo que suas interações indiquem um cenário passível de ser modelado e apresentado em meio digital, configurando-se em uma análise espacial, “em que a modelagem refere-se à representação simbólica dos relacionamentos entre objetos espaciais e seus atributos.” (MEIRELLES, 1997, p. 39).

Hasenack *et al.* (1998, p. 3) afirmam que “um critério é alguma base mensurável e avaliável para uma decisão, e pode ser um fator ou uma restrição. Um fator realça ou ameniza a aptidão de uma alternativa específica para um propósito em consideração e uma restrição é uma limitação absoluta das alternativas em análise”.

TABELA 3 - CONDICIONANTES SUBMETIDOS AO PROCESSAMENTO EM SIG E OS RESPECTIVOS PARÂMETROS QUE INDICARAM ÁREAS SUSCETÍVEIS E DE RISCO A MOVIMENTOS DE MASSA.

		Autores															
Condicionantes	Parâmetros	Francisco (1996)	Vanacor (2006)	Zaidan (2006)	Araújo (2004)	Varanda (2006)	Lima e Souza (2008)	Dias e Herrman (2002)	Soares <i>et. al.</i> (2002)	Reimer (2006)	Barnetche e Moretti (2004)	Cardozo e Herrman (2011)	Marcelino (2004)	Martini <i>et al.</i> (2006)	Vieira (2007)	Schaefer <i>et al.</i> (2012)	Zêzere <i>et al.</i> 2005
Declividade (%)	0 à 20								X								
	20,1 à 30		X				X	X				X	X			X	X
	30,1 à 45	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X
	> 45	X	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X
Forma da vertente	Côncava			X	X				X			X	X		X		X
	Retilínea				X			X				X			X		X
	Convexa									X							
Altitude	0 à 200				X												
	200 à 500	X	X										X		X		
	500 à 800	X	X	X									X	X			
	800 à 1100			X		X			X								
	> 1100		X			X											
Litologia	Magmáticas	X	X		X					X			X				
	Metamórficas								X								
	Colúvios/elúvios													X			X
Cobertura vegetal e Uso da terra	Solo exposto	X	X	X	X	X							X	X		X	
	Pastagem / gramíneas			X			X	X									
	Mata	X	X														X
	Cultura													X			
	Área edificada							X			X						
	Loteamento urbano			X		X		X		X	X					X	X
Rios (distância em metros)	0 à 100		X	X			X						X			X	
	100à 300																
	Acima de 300																
Tipos de solo	Cambissolos												X			X	
	Argissolos		X			X							X	X		X	
	Neossolos																

Org.: O autor (2013).

4.2.3 Levantamento de campo

O trabalho de campo foi realizado durante todo o desenvolvimento da pesquisa, visando a princípio, o reconhecimento e caracterização da área de estudo e posteriormente, a confirmação dos resultados obtidos. Neste sentido, foram efetuadas anotações e registros fotográficos referentes aos aspectos naturais e de uso da terra na bacia, assim como observações gerais da magnitude dos movimentos de massa e processos correlatos, ocorridos no dia 11 de março de 2011, dos impactos para a população e das alterações na paisagem local.

Os levantamentos de campo oportunizaram observações do material depositado em diversos pontos da bacia hidrográfica, sobretudo na planície de deposição e na calha de um dos afluentes do Rio Jacareí, o Rio Tingidor, localizado à sua margem direita, com nascente no alto da Serra da Prata, trecho em que a intensidade do evento foi maior.

Com uso de GPS de navegação de precisão decimétrica foram obtidas coordenadas de diversos pontos de controle na bacia hidrográfica. Este trabalho permitiu a elaboração e apresentação de um mosaico de imagens com diferentes categorias de suscetibilidade do terreno contribuindo para validação do modelo.

Ressalta-se que houve dificuldade de acesso em alguns pontos importantes, sobretudo aqueles com declividades e altitudes elevadas, onde a ausência da cobertura vegetal em função do desprendimento de materiais deixavam visíveis as cicatrizes nas encostas oriundas dos processos que aconteceram no episódio em análise.

De posse dos recursos descritos, as análises de gabinete contaram com apoio de material cartográfico, folha topográfica, fotografias aéreas, imagens de satélite anteriores e posteriores ao evento, que possibilitaram a interpretação e geração de novas informações como: análise do mapa de inventário com as cicatrizes dos eventos de março de 2011, reconhecimento do modelado do relevo e formas das vertentes, constatação do tipo do perfil do canal fluvial, identificação da composição assimétrica do vale, tipo e intensidade de uso ocupação da terra, entre outras. A FIGURA 29 apresenta o recorte da área destacada em folha topográfica 1:25.000, onde as observações de campo se concentraram.

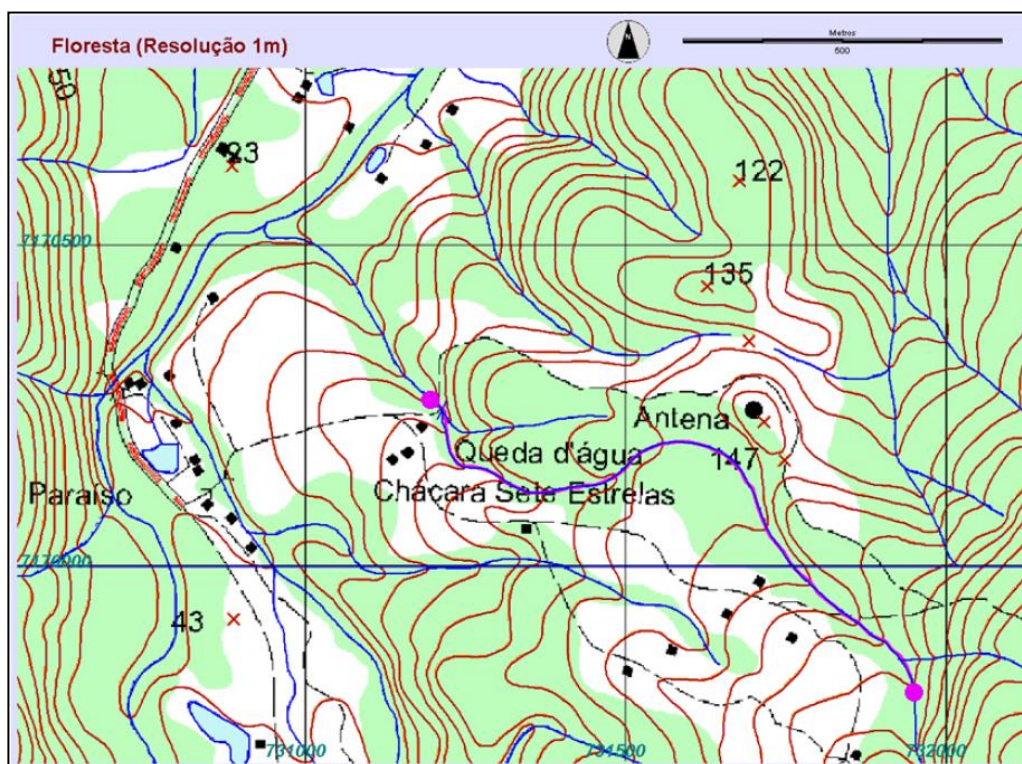


FIGURA 29 - Detalhe do segmento do vale do Rio Tingidor, afluente do Rio Jacareí, percorrido na linha de talvegue, destacado pelo traço em magenta, entre os dois pontos dessa cor, comunidade de Floresta, município de Morretes-PR. Recorte da carta topográfica Alexandra, Folha SG.22-X-D-V/2-NO, escala 1:25.000. FONTE: Diretoria de Serviço Geográfico do Exército - DSG (1998). Adaptado Laboratório de Geoprocessamento e Estudos Ambientais - LAGEAMB (2013).

4.2.4 Utilização do Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Por se tratar de uma pesquisa que considera um conjunto de fatores condicionantes de instabilidade das vertentes, que consequentemente indicam a suscetibilidade dos terrenos aos movimentos de massa e também que alguns fatores são mais importantes do que outros para ocorrência dos processos, segundo a literatura considerada, a análise ganha caráter multicriterial. Neste Sentido, o Sistema de Informações Geográficas contempla a necessidade de tratamento das informações agregadas, por oferecer módulos especialmente preparados para processos de tomada de decisão, quando são consideradas diversas variáveis.

As ferramentas disponibilizadas pelo *software* IDRISI TAIGA, possibilitaram a geração dos planos de informação (PI's), padronização, ponderação dos fatores condicionantes e processamento dos dados gerados, resultando em informações determinantes no processo da modelagem.

4.2.4.1 Geração e adaptação dos Planos de Informação (PI's)

Utilizando-se de produtos cartográficos, informações quantitativas e qualitativas, tais como: dados temáticos (geologia, pedologia, geomorfologia, drenagem, uso da terra, etc.), imagens de satélites e fotografias aéreas foram gerados Planos de Informação (PI's) em formato matricial ou raster e vetorial, que formaram um banco de dados de entrada, consolidando a base para o processamento cruzado e geração dos modelos, todos georreferenciados e/ou transformados para o sistema de projeção UTM, datum horizontal Sad 69³⁶, zona 22s e datum vertical de Imbituba-SC.

Entretanto, em função da inexistência de material adequado a escala de análise e ao recorte específico da Bacia Hidrográfica, foi adaptada e editada uma base cartográfica digital a partir dos dados (mapas compilados) disponibilizados pela MINEROPAR S/A (2011) e da Folha Topográfica Alexandra, SG.22-X-D-V/2-NO, escala 1:25.000, com equidistância das curvas de nível de 10 metros, da Diretoria do Serviço Geográfico do Exército - DSG (1998).

Desta base cartográfica citada foram derivados os PI's conforme descrição:

- ✓ **Drenagem:** gerado a partir da digitalização dos cursos d'água, efetuada no *software* CartaLinx, tendo como base a Folha Topográfica Alexandra, SG.22-X-D-V/2-NO, escala 1:25.000, importado para o *software* IDRISI TAIGA em formato vetorial e posteriormente convertido para o formato raster por meio do módulo *RASTERVECTOR*.
- ✓ **Modelo Numérico do Terreno:** gerado a partir das curvas de nível com equidistância de 10 metros, digitalizadas sobre a Folha Topográfica Alexandra, SG.22-X-D-V/2-NO, escala 1:25.000 com uso do *software* CartaLinx e interpolado com o módulo TIN (*Triangulated Irregular Network*) do *software* IDRISI TAIGA.
- ✓ **Declividade:** o plano de informação da declividade foi gerado a partir do Modelo Numérico do Terreno, utilizando-se do comando *Surface Analysis, Topographic Variables, Slope*, disponível no *software* IDRISI TAIGA.

³⁶ O South American Datum 1969 (SAD 69) foi adotado para todo o processamento dos dados cartográficos ocorrido entre os anos de 2011 e 2014, período em que este sistema geodésico de referência era admitido no Brasil e utilizado concomitantemente ao Sistema de Referencial Geodésico da América do Sul (SIRGAS), estabelecido em 2005 e adotado pelo IBGE como novo Sistema Geodésico Brasileiro, que substituiu o SAD 69 oficialmente em 25 de fevereiro de 2015. (IBGE, 2015).

✓ **Hipsometria:** o plano de informação referente às amplitudes altimétricas da área de estudo é um produto cartográfico também derivado do Modelo Numérico do Terreno, sendo posteriormente efetuado a reclassificação de 200 em 200m totalizando 8 classes hipsométricas, no módulo RECLASS do *software* IDRISI TAIGA.

✓ **Forma das vertentes:** derivado do Modelo Numérico do Terreno, utilizando-se do comando *Surface Analysis, Topographic Variables, Curvature*, disponível no *software* IDRISI TAIGA. A partir do processamento, este PI assumiu valores positivos, nulos e negativos de curvatura em seu perfil. Os valores positivos referem-se às vertentes convexas, os valores nulos, ou praticamente nulos, as vertentes retilíneas e os valores negativos as vertentes côncavas. (VALERIANO, 2008).

A base cartográfica gerada também se serviu da adaptação dos PI's:

✓ **Litologia:** concedido pela MINEROPAR S/A em formato *shapefile* vetorial, gerado a partir do Mapeamento Geológico do Estado do Paraná, escala original 1:250.000, importado para o *software* IDRISI TAIGA pelo módulo *Import - ESRI Formats - SHAPIDR* e convertido para formato raster com uso do módulo *RASTERVECTOR*. Este plano de informação está dividido em 12 classes distintas.

✓ **Solos:** também concedido pela MINEROPAR S/A em formato *shapefile* vetorial, sistema UTM, datum Sad 69, gerado a partir do Mapa de Solos do Estado do Paraná em escala original 1:600.000 por Bhering e Santos (2008), este foi importado para o *software* IDRISI TAIGA pelo módulo *Import - ESRI Formats - SHAPIDR* e convertido para o formato raster através do comando *RASTERVECTOR*. Este plano com recorte da Bacia do Rio Jacareí foi composto por 7 classes de solos e associações.

✓ **Uso e ocupação da terra e cobertura vegetal:** plano de informação obtido no formato *shapefile* vetorial, sistema UTM, datum Sad 69, produzido a partir das imagens SPOT dos anos de 2005 e 2006 pelo ITCG e PARANACIDADE (inédito), atualizado com base na imagem LANDSAT5, de 19 de novembro de 2010, com 30 metros de resolução e reclassificado de forma a refletir as classes de ocupação em função da intensidade da presença humana, fornecido pela MINEROPAR S/A (2011), importado para o *software* IDRISI TAIGA pelo módulo *Import - ESRI Formats - SHAPIDR* e convertido para o formato raster pelo módulo *RASTERVECTOR*. Este PI foi composto por treze classes de uso e ocupação da terra e vegetação (FIGURA 30).

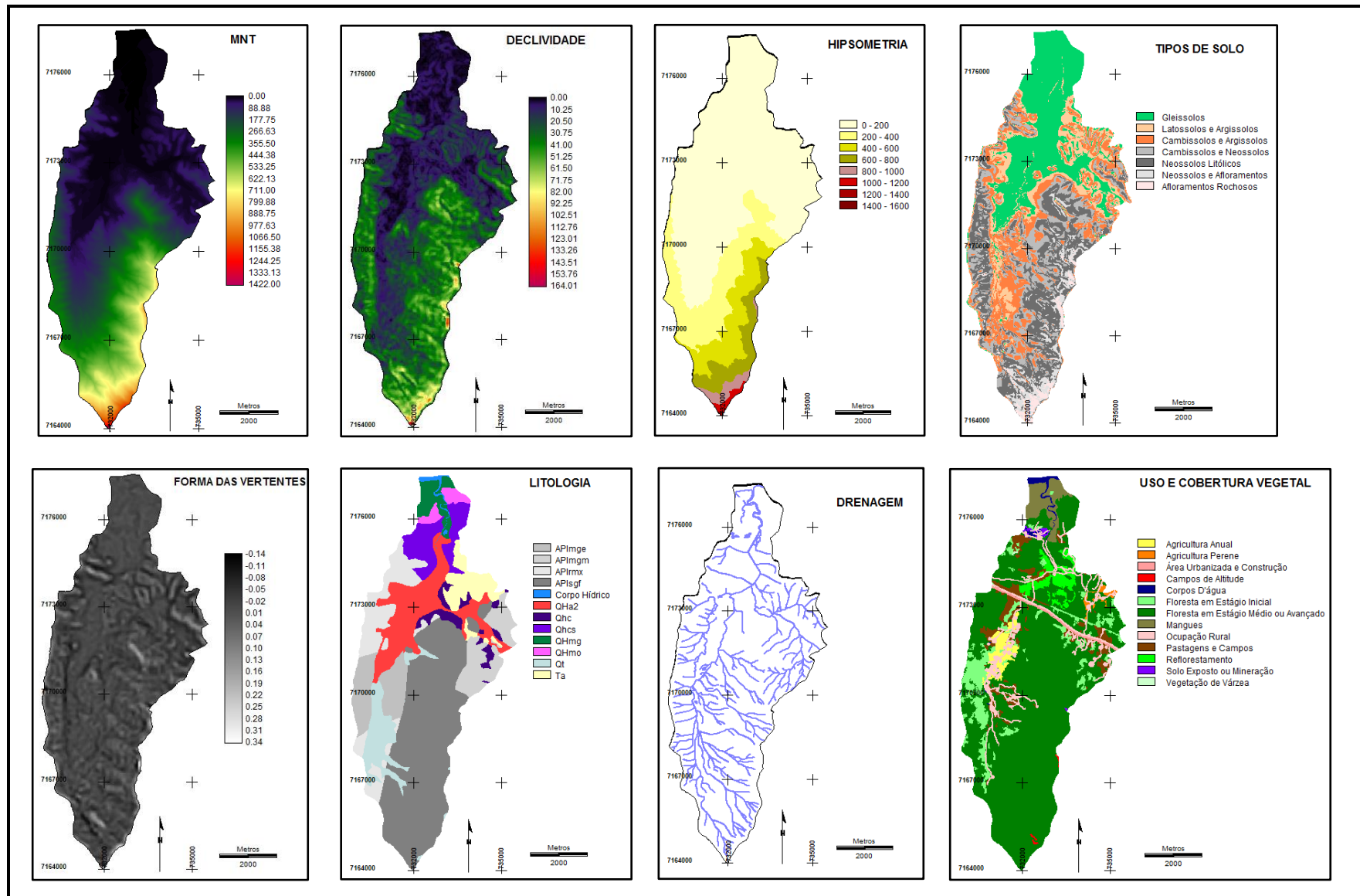


FIGURA 30 – Cartograma com os PI's utilizados como base de entrada para desenvolvimento da pesquisa. Na ordem: Modelo Numérico do Terreno; Declividade; Hipsometria; Tipos de solo; Forma das Vertentes; Litologia; Drenagem; Uso da Terra e Cobertura Vegetal. Org.: O autor (2014).

4.2.5 Avaliação Multicritério

Definidos os condicionantes ou critérios determinantes para serem submetidos ao processo de avaliação e gerados seus respectivos PI's, restrição: declividade inferior a 6% e fatores: declividade; altitude; distância dos rios; forma das vertentes; tipos de solo; litologia; uso da terra e cobertura vegetal, estes passaram a funcionar como variáveis/atributos, que indicam áreas com maior instabilidade das vertentes e, portanto, associam-se à distribuição espacial dos movimentos de massa.

No *Software* IDRISI a Avaliação Multicritério é executada através da rotina MCE (*Multi Criteria Evaluation*) em que é possível avaliar e agregar muitos critérios. Várias técnicas de MCE podem ser exploradas: o método *Booleano*, a Combinação Linear Ponderada – WLC e a Média Ponderada Ordenada – OWA (EASTMAN, 1998, p. 174).

Como os fatores adotados estão originalmente, em unidades de medidas diferentes, por exemplo: a declividade é representada em percentual, a altitude em metros, o uso da terra e a cobertura vegetal em classes nominais e assim por diante, estes foram convertidos para uma escala única de medida.

Para resolver esta questão e viabilizar a agregação completa dos critérios selecionados é necessário que seus valores sejam uniformizados e reescalados para um intervalo numérico comum, procedimento passível de ser efetuado por meio da padronização *Fuzzy*, no qual os valores são convertidos para uma escala normalizada, que os tornam compatíveis e comparáveis. Segundo (Eastman 1998, p. 174) “Essencialmente, este é o processo de conversão de valores de critérios em expressões de associação ao conjunto.”

4.2.5.1 Padronização dos critérios

Quanto à padronização dos planos de informação foi utilizado o modelo probabilístico *Fuzzy*, presente no *software* IDRISI TAIGA. Souza *et al.* (2005, p. 142) afirmam que “a finalidade da padronização *Fuzzy* é colocar todos os fatores considerados na análise, em uma mesma escala, para tornar possível a integração de

todos os dados em ambiente de geoprocessamento.” Complementando, Weber e Hasenack (2001, p. 07) consideram que “a padronização pode ser feita para um intervalo em nível de *bytes*, entre 0 e 255, utilizando-se funções *Fuzzy* de pertinência a conjuntos específicos de cada variável, de acordo com critérios estabelecidos.”

Neste estudo, a padronização *Fuzzy* foi ajustada em sua valoração em relação aos objetivos da pesquisa (*em bytes*), de modo que 0 indica áreas menos suscetíveis e 255 mais suscetíveis, admitindo-se valores intermediários. Cada fator condicionante foi reescalado de acordo com uma ordem de importância para o objetivo proposto, por meio das funções de pertinência *Fuzzy* (Linear, Sigmoidal, *J-shaped* e *User-Defined*). Entretanto, nem todos os fatores puderam ser submetidos ao mesmo processo de padronização, por estarem em escala qualitativa ou nominal. Nesses casos, foram atribuídos valores arbitrários, mantendo a valoração entre 0 e 255, de acordo com o potencial considerado, com referência na literatura consultada, para posteriormente ser ajustada em uma função de pertinência correspondente.

A padronização foi baseada na consulta em autores que abordam a temática, conforme descrito no referencial teórico e na análise de estudos de casos específicos (TABELA 3, pág. 127) que estabeleceram parâmetros para os condicionantes adotados.

É oportuno destacar que os critérios são de dois tipos: restritivos, que limitam absolutamente as alternativas em análise e fatores, que aumentam ou diminuem a potencialidade de uma alternativa específica. Em pesquisas que consideram restrições, primeiramente estas são reclassificadas pelo método *Booleano* rígido, para que posteriormente, os fatores sejam padronizados pela técnica *Fuzzy*. O procedimento está detalhado nos subitens a seguir:

4.2.5.1.1 Restrição: declividade inferior a 6%

As baixas declividades, não são superfícies propensas às ocorrências dos movimentos de massa na forma de escorregamentos, quedas e rolamento de blocos, são terrenos em que, no ambiente em questão, ocorre a deposição dos sedimentos deslocados das cabeceiras das encostas. Deste modo, na análise, as áreas com

declividades inferiores a 6% foram consideradas restritas, ou seja, adotado como um critério restritivo. Foi aplicada, portanto, uma máscara *Booleana*.

Este parâmetro foi inferido a partir da análise de trabalhos específicos (TABELA 3, pág. 127) que demonstram estabilidade nas vertentes entre estes índices de declividade e também ao considerar a compartimentação geomorfológica descrita pela MINEROPAR (2006) que divide a região em três subunidades morfoesculturais: Planície Litorânea e Fluvio-Marinhas, com classe de declividade menor que 6%; Rampas de Pré-Serras e Serras isoladas, com declividade predominante entre 6-30% e a Serra do Mar (na área de estudo corresponde a Serra da Prata) com classe predominante de 12-30%.

O método rígido *Booleano* isolou da análise os terrenos com declividades entre 0 e 6% e portanto, determinou que somente existe instabilidade nas vertentes com declives acima de 6%. Este procedimento impediu que, eventualmente, terrenos praticamente planos, apresentasse algum nível de suscetibilidade, em função da compensação com outros fatores considerados. O processo foi executado utilizando-se do módulo *RECLASS* do *software* IDRISI TAIGA.

4.2.5.1.2 Fator: declividade

Após aplicar a máscara *Booleana* para excluir da análise os declives inferiores a 6% utilizou-se também o critério de classes superiores de declividade como fator. Praticamente a totalidade dos estudos voltados à estabilidade/fragilidade das encostas considera esta variável como relevante.

Neste sentido, efetuou-se a padronização *Fuzzy*, com valores contínuos para esse condicionante. O referencial consultado, assim como as pesquisas específicas (TABELA 3 pág. 127), indicaram parâmetros mais propícios à instabilidade das encostas. De forma geral, a partir de 30% de declividade os movimentos de massa são mais frequentes, desde que, associados a outros fatores, embora algumas pesquisas tenham indicado ocorrências em declives menores, entre 20 e 30%.

Admitindo uma margem de 5%, utilizou-se a função sigmoideal crescente, com pontos de controle a:25% e b:45% considerando, portanto, que em declividades entre 0

e 25% a encosta é relativamente estável e após este ponto, a medida que aumenta a declividade, a suscetibilidade aos processos torna-se maior, alcançando potencial elevado nos 45% e a partir deste (FIGURA 31).

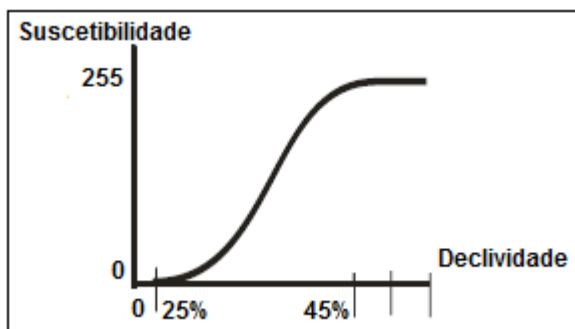


FIGURA 31 - Sigmoideal Crescente – Declividade. FONTE: Adaptado de Eastman (1998, p. 185).

4.2.5.1.3 Fator: altitude

Semelhante à declividade, a altitude é um fator condicionante comumente utilizado em pesquisas relacionadas às análises de estabilidade das encostas e processos associados. Ficou evidenciado nos trabalhos analisados, que não há limites precisos entre altitude e ocorrência dos movimentos de massa, além disso, cada área de estudo guarda peculiaridades quanto a esse fator. Entretanto, é consenso entre os autores, que quanto maior a amplitude altimétrica, maior é a energia potencial exercida pela água das chuvas e conseqüentemente maior a instabilidade das vertentes.

Os estudos específicos (TABELA 3 pág. 127) indicaram parâmetros para este fator e de modo geral, admitem que os movimentos de massa têm maior incidência, a partir dos 500m de altitude. Porém, Crepani *et al.* (2001) consideram vulneráveis as amplitudes altimétricas acima de 200 metros.

Diante dos pressupostos descritos e considerando a variação altimétrica da bacia em análise (0 a 1422m), adotou-se para este condicionante, a função sigmoideal crescente, com pontos de controle a:200m e b:500m de altitude, estabelecendo que entre 0m e 200m a encosta é estável e a partir deste ponto a suscetibilidade aumenta gradativamente até os 500m, estabilizando-se com potencial elevado a partir deste ponto (FIGURA 32).

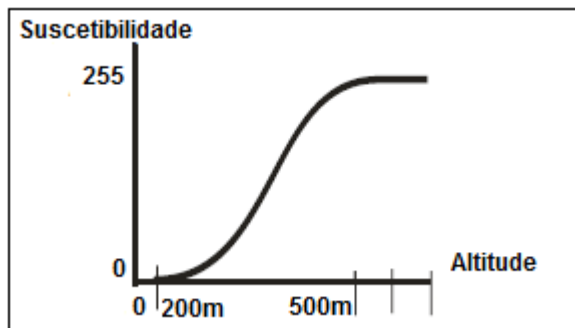


FIGURA 32 - Sigmoide Crescente – Altitude. FONTE: Adaptado de Eastman (1998, p. 185).

4.2.5.1.4 Fator: distância dos rios

Temesgen *et al.* (2001) afirmam que a proximidade com os cursos d'água está diretamente vinculada à forma da encosta, à umidade e à formação de sulcos e ravinas. Nestas áreas as encostas apresentam-se geralmente em seções côncavas, que por serem zonas de convergência de fluxos d'água (superficiais e subsuperficiais), favorecem a condição de saturação do solo e intensificam a atuação dos processos erosivos.

Na ocorrência de corridas de lama, os canais fluviais funcionam como verdadeiras “vias” por onde escoam sedimentos desprendidos das cabeceiras das encostas. Geralmente, grande parte do material intemperizado e desagregado é carregado para a calha do rio, onde as partículas mais finas são transportadas para jusante pela força da água e parte do material mais grosseiro fica retido, sendo por vezes, deslocados posteriormente, em eventos futuros.

Por meio de consulta aos estudos específicos com parâmetros definidos (TABELA 3 pág. 127) e também considerando a análise de dissecação do relevo, baseando-se em Ross (1994) e Crepani *et al.* (2001), que definem valores de vulnerabilidade conforme distâncias dos interflúvios, estabelecendo que as distâncias inferiores a 250m indicam elevada vulnerabilidade e predomínio de morfogênese, determinou-se que as áreas de maior instabilidade são aquelas situadas até 50m de distância dos rios e a medida que vai aumentando essa distância, as encostas tornam-se mais estáveis. Neste caso, utilizou-se a função sigmoide decrescente, com pontos de controle c:0m e d:50m (FIGURA 33).

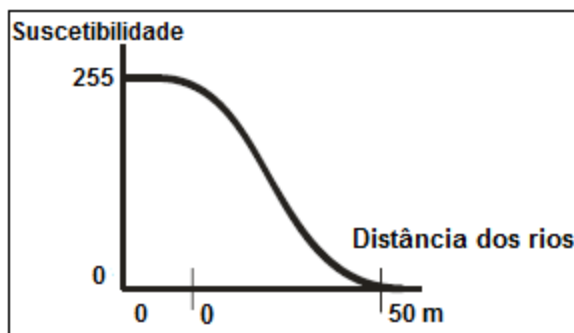


FIGURA 33 - Sigmoide Decrescente – Distância dos rios. FONTE: Adaptado de Eastman (1998, p. 185).

4.2.5.1.5 Fator: forma das vertentes

A forma das vertentes é um aspecto geomorfológico que tem influência direta na estabilidade das encostas. De acordo com o referencial teórico e os parâmetros definidos em trabalhos específicos (TABELA 3 pág. 127), os perfis côncavos são referidos como os que apresentam maior predisposição à incidência de processos erosivos e movimentos de massa, por concentrarem maior volume de água e sedimentos. Em seguida estão os perfis retilíneos, e por último os convexos.

Para a padronização deste fator utilizou-se o plano de informação com a curvatura numérica, com variação entre $-0.18^\circ/\text{m}$ a $0.34^\circ/\text{m}$ considerando, conforme Valeriano (2008, p. 36) que os valores negativos indicam os perfis côncavos, positivos os convexos e os nulos ou próximos a zero indicam as vertentes retilíneas. Adotou-se a função sigmoide decrescente, com pontos de controle em c: $-0.18^\circ/\text{m}$ e d: $0.34^\circ/\text{m}$, ou seja, à medida que os valores de curvatura aumentam a suscetibilidade aos processos diminui (FIGURA 34).

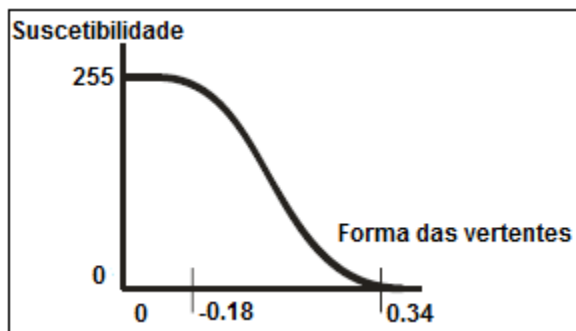


FIGURA 34 - Sigmoide Decrescente – Forma das vertentes. FONTE: Adaptado de Eastman (1998, p. 185).

4.2.5.1.6 Fator: tipos de solo

Conforme Nummer (2003) os parâmetros e propriedades dos solos tais como: peso específico, porosidade, índice de vazios, mineralogia, granulometria, plasticidade, permeabilidade e compressibilidade tem influência direta ou indireta na suscetibilidade aos movimentos de massa.

Para a determinação dos solos com maior ou menor grau de suscetibilidade utilizou-se o mapa de solos da bacia do Rio Jacareí, disponibilizado pela MINEROPAR S/A (2011) com classes definidas.

Por ser um condicionante qualitativo, ou seja, com classes nominais, primeiramente foram definidos valores de suscetibilidade para cada classe e depois adaptado a uma função de pertinência *Fuzzy*.

Sem levar em consideração a localização de determinada classe de solo, se em áreas de deposição ou de erosão e de acordo com o proposto por Bigarella *et al.* (2003), considerou-se os argilosos e associações os solos mais suscetíveis, pois estes apresentam descontinuidades dentro do próprio perfil, possuindo horizonte inferior com maior capacidade de armazenamento de água, que resulta em maior facilidade de saturação e consequentemente de movimentação da camada superficial.

Neste contexto foram atribuídos valores entre 0, suscetibilidade mínima e 255 suscetibilidade máxima, para cada classe, de acordo com sua predisposição aos processos (TABELA 4).

TABELA 4 - VALORES ATRIBUÍDOS DE ACORDO COM A SUSCETIBILIDADE DOS SOLOS À EROSÃO E MOVIMENTOS DE MASSA.

Classes de solos	Valoração (0 e 255)
1- Gleissolos	50
2- Latossolos e Argissolos	200
3 – Cambissolos e Argissolos	255
4 – Cambissolos e Neossolos	150
5 – Neossolos Litólicos	100
6 – Neossolos e Afloramentos	100
7 – Afloramentos Rochosos	50

Org.: O autor (2013).

Conforme as diferentes categorias de associações dos solos, com valores de suscetibilidade definidos, para a padronização completa utilizou-se a função linear crescente, com pontos de controle mínimo e máximo, respectivamente a:50 e b:255 (FIGURA 35).

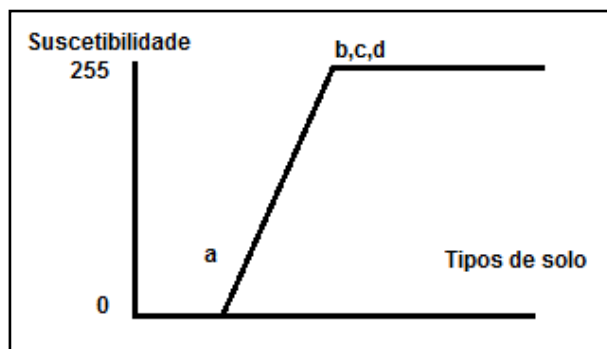


FIGURA 35 - Linear Crescente – Tipos de Solo. FONTE: Adaptado de Eastman (1998, p. 185).

4.2.5.1.7 Fator: litologia

Lepsch (2002) menciona que a litologia, mesmo exercendo um “papel passivo” à ação climática e orgânica, influencia no tipo de solo (material mineral), como também nas suas características intrínsecas (permeabilidade, resistência ao cisalhamento, granulometria, etc.).

De acordo com o Crepani *et al.* (2001) em rochas pouco coesas podem prevalecer os processos erosivos, modificadores das formas de relevo (morfogênese), enquanto que nas rochas bastante coesas devem prevalecer os processos de intemperismo e formação de solos (pedogênese).

Como este condicionante está classificado nominalmente, utilizou-se o mapeamento geológico-geotécnico simplificado da bacia do Rio Jacareí, elaborado pela MINEROPAR S/A (2011), consulta à literatura, aos parâmetros utilizados em trabalhos específicos (TABELA 3 pag. 127) e ainda o estudo da resistência das rochas ao intemperismo elaborado por Crepani *et al.* (2001), e de instabilidade ecodinâmica, Silveira (2005), para que, conforme as diferentes classes de ocorrência na área de estudo, fossem atribuídos valores entre 0 e 255, de acordo com o grau de suscetibilidade (TABELA 5).

TABELA 5 - VALORAÇÃO DO GRAU DE RESISTÊNCIA DAS ROCHAS PARA INTEMPERISMO E EROÇÃO.

Unidade Geológica	Sigla	Classes litológicas	Valores (0 - 255)
Complexo Gnáissico-Migmatítico	APImge	Migmatitos estromáticos com paleosoma de biotita-hornblenda gnaiss, mica-quartzo xisto, ultrabásito, metabásito e anfibolito	100
	APImgm	Migmatitos oftálmicos, com paleosoma de biotita gnaiss, biotita-hornblenda gnaiss e hornblenda gnaiss, localmente com quartzitos	100
	APIsgf	Suíte granítica foliada, granitos metassomáticos ou de anatexia, indiferenciados	100
Complexo Metamórfico Indiferenciado	APIrmx	Biotita-muscovita xistos e clorita-biotita-muscovita xistos, com ocorrências locais de quartzo xistos e quartzitos.	150
Sedimentos Recentes	Qha2	Aluviões recentes	200
	Qhc	Depósito de colúvio associados à depósitos de tálus, com argila, silte, areias e seixos	255
	Qhcs	Cascalheiras continentais retrabalhadas	255
	QHmg	Sedimentos fluviomarinhas, associados à manguezais	150
	QHmo	Sedimentos argilo-siltico-arenosos, paleoestuarinos	255
	Qt	Depósitos de tálus, blocos em matriz argilosa	255
Formação Alexandra	Ta	Conglomerados, arcósios, areias e argilitos	200

FONTE: Crepani *et al.* (2001); Silveira (2005). Adaptado pelo autor.

Para a finalização da padronização utilizou-se a função linear crescente com os pontos de controle a:100 e b:255, conforme valores determinados anteriormente (FIGURA 36).

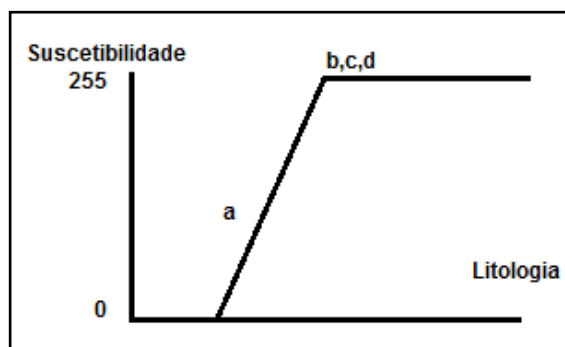


FIGURA 36 - Linear Crescente – Litologia. FONTE: Adaptado de Eastman (1998, p. 185).

4.2.5.1.8 Fator: uso, ocupação da terra e cobertura vegetal

É consenso entre os autores consultados, que a cobertura vegetal protege os solos reduzindo a quantidade de energia durante as chuvas, a serapilheira atua diminuindo a velocidade do escoamento superficial, além do papel das raízes na estruturação do solo. Portanto, entende-se que a vegetação contribui para manter a estabilidade das encostas, reduzindo a possibilidade de ocorrência de processos erosivos e dos movimentos de massa, admitindo que o solo exposto ou com outra atividade antrópica (que não sejam aquelas voltadas diretamente para reestabelecer o equilíbrio das vertentes) geralmente deixa o terreno mais instável.

Esta variável é relevante, pois integra as informações relativas à vegetação e áreas ocupadas e antropizadas. Por se tratar de um fator com classes nominais, este foi padronizado numa escala de valores entre 0 (menos suscetível) e 255 (mais suscetível) de acordo com suas classes de potencial, seguindo critérios e parâmetros adotados por diversos trabalhos, com destaque para os estudos de Ross (1994), Crepani *et al.* (2001), Silveira (2005) e Cunico (2006) (TABELA 6). Utilizou-se como base o mapa de uso da terra e cobertura vegetal disponibilizado pela MINEROPAR S/A (2011).

TABELA 6 - VALORES ATRIBUÍDOS À SUSCETIBILIDADE DE ACORDO COM USO DA TERRA E COBERTURA VEGETAL.

Uso e ocupação da terra e cobertura vegetal	Valoração (0 e 255)
1 Agricultura anual	150
2 Agricultura perene	150
3 Área construída	255
4 Campos de altitude	100
5 Corpos d'água	150
6 Floresta estágio inicial	100
7 Floresta estágio médio ou avançado	50
8 Mangues	0
9 Ocupação rural	150
10 Pastagens e campos	150
11 Reflorestamento	100
12 Solo exposto ou mineração	255
13 Vegetação de várzea	50

Org.: O autor (2013)

Assim como nos critérios anteriores, para o fator uso da terra e cobertura vegetal, por possuir classes nominais, primeiramente foram atribuídos valores diretos

entre 0 a 255, para depois ser adotado uma função de pertinência *Fuzzy*. Novamente foi utilizada a função linear crescente, com pontos de controle a:0 e b:255, pois foram os valores de suscetibilidade estipulados (FIGURA 37).

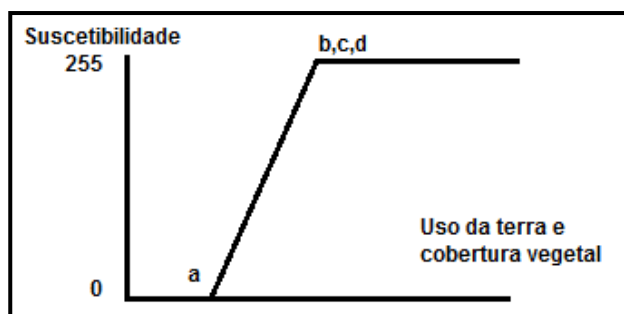


FIGURA 37 - Linear Crescente – Uso e ocupação da terra e cobertura vegetal. FONTE: Adaptado de Eastman (1998, p. 185).

4.2.5.2 Ponderação das variáveis

Conforme referencial teórico **item 2.6.1**, reconhecendo que para a determinação das áreas suscetíveis aos movimentos de massa exige-se a integração e avaliação de uma série de condicionantes e que esses atributos interferem na instabilidade das vertentes com pesos diferenciados, ou seja, um condicionante tem influência mais significativa do que outro, após a padronização *Fuzzy* foi necessário à ponderação das variáveis, seguindo a proposta de Saaty (1980), técnica AHP (*Analytical Hierarchy Process*), possível de ser efetuada no módulo *WEIGHT* do *Software IDRISI*. “Esse método de comparação da importância relativa das variáveis, duas a duas, auxilia no estabelecimento dos pesos finais dos fatores diminuindo a subjetividade.” (WEBER; HASENACK, 2001, p.7).

Este procedimento tem como objetivo definir a importância relativa de cada uma das variáveis envolvidas para serem submetidas aos métodos de agregação: Combinação Linear Ponderada e Média Ponderada Ordenada. A atribuição dos pesos para os fatores em análise deve estar de acordo com a importância que cada um tem como condicionante de instabilidade das vertentes.

Nessa fase do trabalho, ressalta-se a importância de uma sólida fundamentação teórica e também do conhecimento empírico dos envolvidos. Miranda

(2005, p. 319) salienta que “deve-se tomar cuidado na hora de atribuir pesos, porque tal procedimento é crítico para o uso de técnicas multicritério, eles podem influenciar no resultado final da análise de avaliação.” Samizava *et al.* (2008, p. 53) enfatizam que:

O conhecimento empírico do usuário é que orienta a atribuição de valores de importância relativa entre as variáveis, o que determina a aderência do modelo à realidade é que os trabalhos em campo, associados ao conhecimento, auxiliam na diminuição da subjetividade inerente ao processo de análise hierárquica, produzindo informações mais coerentes para a sua aplicação.

Câmara *et al.* (2001 p. 30) “consideram que a partir do estabelecimento de critérios de comparação para cada combinação de fatores, é possível determinar um conjunto ótimo de pesos que podem ser utilizados para a combinação dos diferentes mapas.” Nos QUADROS 4 e 5 são apresentadas as escalas pré-definidas de valores a serem atribuídos por meio da técnica AHP, destinada à ponderação dos pesos proposta por Saaty (1980).

Intensidade de importância	Definição e Explicação
1	Importância igual – os dois fatores contribuem igualmente para o objeto
3	Importância moderada – um fator é ligeiramente mais importante que o outro
5	Importância essencial – um fator é claramente mais importante que o outro
7	Importância demonstrada – um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática
9	Importância extrema – a evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível
2,4,6,8	Valores intermediários entre julgamentos – possibilidade de compromissos adicionais

QUADRO 4 - ESCALA DE VALORES AHP PARA COMPARAÇÃO PAREADA.
FONTE: Adaptado de Saaty (1980).

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
extrema- mente	Bastante	muito	pouco	igual	pouco	muito	bastante	extrema- mente
MENOS IMPORTANTE					MAIS IMPORTANTE			

QUADRO 5 - ESCALA DE COMPARAÇÃO DE CRITÉRIOS.

FONTE: Adaptado de Saaty (1980).

A técnica AHP combina os diversos critérios atribuindo-lhes pesos e ponderando a participação individual no processo, resultando em pesos finais de importância relativa para cada critério. Uma das vantagens desse processo é a possibilidade de refazer o cálculo dos pesos quantas vezes julgar-se necessário, pois o método informa os novos pesos juntamente com uma razão de consistência (CR- *Consistency Ratio*) alertando o usuário sobre possíveis equívocos. (EASTMAN, 1998, p. 187).

Segundo Saaty e Vargas (1991)³⁷ *apud* Zambon *et al.* (2005, p. 189) “quando a CR é superior a 0,10 é necessário reavaliar o processo. Esta afirmação foi feita baseando-se em vários contextos em que se utilizou o método AHP para a resolução de problemas complexos.” Utilizando-se do *software* IDRISI TAIGA foi possível executar a operação gerando a CR automaticamente.

Diante dos pressupostos descritos, a hierarquia adotada para os fatores utilizados ficou organizada da forma seguinte:

1 - Para a **declividade** foi atribuído maior peso, uma vez que os registros de movimentos de massa no Brasil indicam estreita correlação entre este condicionante e a distribuição espacial dos processos. Trata-se de um fator analisado prioritariamente em estudos geotécnicos. Acrescenta-se ainda o fato de que os valores da declividade são diretamente proporcionais à energia cinética, derivada da energia potencial das chuvas atuantes na desagregação e transporte de material vertente abaixo.

2 - O condicionante **forma das vertentes**, que por sua vez está associado ao escoamento superficial, pois de acordo com o perfil de curvatura das vertentes a convergência do fluxo de água é maior ou menor, influenciando na estabilidade das

³⁷ SAATY, T. L. & VARGAS, L.G. **Prediction, Projection and Forecasting**. Kluwer Academic Boston, MA, USA, 1991.

encostas e conseqüentemente na predisposição aos movimentos de massa ficou com o segundo lugar.

3 - A **distância dos rios** assumiu o terceiro lugar, tendo em vista que a forma dos vales contribui para a ocorrência dos processos em suas proximidades, situação confirmada em consulta ao referencial teórico clássico e também aos estudos geotécnicos específicos. As análises e constatações de campo também contribuíram diretamente para esta classificação.

4 - O fator **tipos de solo** ficou em quarto lugar por se caracterizar como um agente passivo, pois envolve o material removido pelos movimentos de massa e ativo, uma vez que também interfere na estabilidade das encostas de acordo com sua composição mineralógica, granulométrica e suas características físicas e químicas, além de aspectos relacionados ao uso e ocupação. Considerando graus de resistência distintos aos processos erosivos, os solos espessos podem ser o produto de movimentos como escorregamentos translacionais, rotacionais e corridas de massa.

5 - O fator **litologia**, classificado em quinto lugar. Assim como o solo, é considerado um agente passivo e ativo, interferindo na estabilidade das encostas devido suas características físicas inerentes. Embora de grande relevância, este condicionante recebeu peso menor de influência se comparado aos anteriores em função da escala de tempo de atuação na modelagem do relevo deste ser muito superior aos demais fatores.

6 - O condicionante **uso da terra e cobertura vegetal** foi classificado em sexto lugar, pois embora haja confirmação da interferência deste na distribuição dos processos, a partir de análise do histórico de grandes episódios no Brasil, constatou-se que mesmo em áreas com vegetação preservada, como no evento aqui estudado, as ocorrências se distribuíram irregularmente. Destaca-se que a pequena ocupação e transformação da paisagem na área de estudo também interferiu diretamente na posição deste fator.

7 - A **altitude** foi o fator classificado em sétimo lugar. Embora haja consenso entre os especialistas que quanto maior a altitude maior a instabilidade das encostas, não existem limites precisos estabelecidos, uma vez que o potencial de energia cinética adquirida pelas águas das chuvas ao caírem nos pontos mais altos do terreno é de difícil mensuração. Outra constatação obtida a partir da análise de estudos específicos

é a de que, invariavelmente, este fator é associado a outros, principalmente a declividade.

Os fatores foram organizados na matriz de comparação pareada, técnica AHP, efetuada no *software* IDRISI TAIGA módulo WEIGHT, resultando em pesos finais de influência individual e na razão de consistência (TABELA 7 e QUADRO 6).

TABELA 7 - DETERMINAÇÃO DOS PESOS DE IMPORTÂNCIA RELATIVA PARA SUSCETIBILIDADE

	Altitude	Uso e cob. vegetal	Litologia	Tipos de solo	Distância dos rios	Forma das vertentes	Declividade
Altitude	1						
Uso e cob. vegetal	2	1					
Litologia	3	2	1				
Tipos de solo	5	3	2	1			
Distância dos rios	5	5	5	3	1		
Forma das vertentes	7	5	5	4	3	1	
Declividade	9	9	8	7	5	5	1

Org.: O autor (2014).

FATOR	PESOS FINAIS
Altitude Fuzzy	0.0240
Uso e cobertura vegetal Fuzzy	0.0332
Litologia Fuzzy	0.0464
Tipos de solo Fuzzy	0.0730
Distância dos rios Fuzzy	0.1376
Forma das vertentes Fuzzy	0.2085
Declividade Fuzzy	0.4773

QUADRO 6 - PESOS FINAIS DE IMPORTÂNCIA RELATIVA

FONTE: *Software* IDRISI TAIGA. Atividade de laboratório. Razão de Consistência = 0.07 (< 0,1 Consistência aceitável).

4.2.5.3 Método da Combinação Linear Ponderada (*Weighted Linear Combination – WCL*)

De posse dos fatores devidamente padronizados pela técnica *Fuzzy*, com valoração contínua de 0 a 255 (*bytes*) e com pesos finais de importância relativa, resultantes da ponderação dos pesos pareados, efetuado pela técnica AHP (*Analytical*

Hierarchy Process) no módulo *WEIGHT*, foi possível efetuar o processo de agregação entre todos os fatores envolvidos na análise, estes foram submetidos ao método de compensação, por meio da Combinação Linear Ponderada (*Weighted Linear Combination* – WCL) do *software* IDRISI TAIGA, presente no módulo de Avaliação por Múltiplos Critérios (*Multi Criteria Evaluation* – MCE) (FIGURA 38).

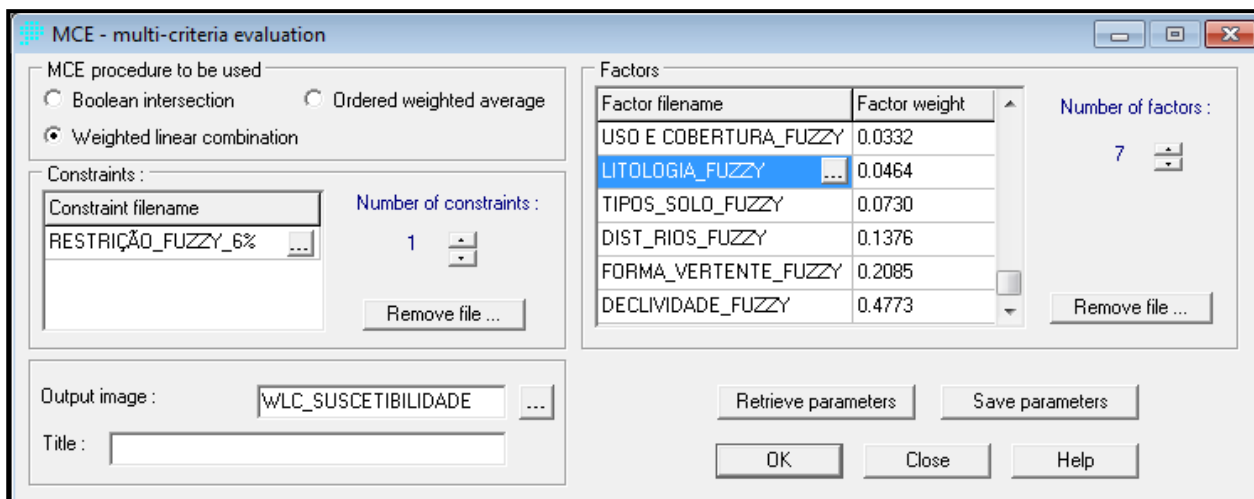


FIGURA 38 - Módulo de Avaliação Multicritério – MCE. Método: Combinação Linear Ponderada – WCL. FONTE: *Software* IDRISI TAIGA. Org.: O autor (2014).

No método WLC, os pesos dos fatores usados expressam a importância relativa de cada critério e determinam como os fatores são compensados entre si. Portanto, um fator como a cobertura vegetal original, atenua potenciais mais elevados de suscetibilidade gerados, por exemplo, pela declividade acentuada. A WLC permite não apenas reter toda a variabilidade dos dados contínuos, mas também a possibilidade dos fatores compensarem-se uns com os outros. O programa multiplica cada fator por seu peso correspondente somando a seguir os resultados. O último passo na WLC é multiplicar o resultado pelas restrições *Booleanas*, eliminando essas áreas da análise. (EASTMAN, 1998).

A Combinação Linear Ponderada se caracteriza pela combinação dos critérios levando-os a um risco médio dentro do Espaço de Decisão Estratégica (FIGURA 39), pois está exatamente entre o processo de minimização (AND) e de maximização (OR) do risco no processo decisório.

4.2.5.4 Método da Média Ponderada Ordenada (*Ordered Weighted Average* - OWA)

A Média Ponderada Ordenada (OWA) possibilita agregações entre os operadores *Booleanos* de intersecção (MIN ou AND) e união (MAX ou OR) com a Combinação Linear Ponderada (WLC), que estabelece a plena compensação. Isto é, ela possibilita controlar o nível de risco (*ANDness*) que pretende-se assumir na análise e o grau com que os pesos dos fatores irão influenciar no resultado (mapa) final. A OWA oferece uma variedade de soluções possíveis para o problema estudado, possui flexibilidade de assumir soluções em qualquer ponto, entre os extremos AND e OR no *Espaço de Decisão Estratégica* (FIGURA 39). (CALIJURI; LOURES, 2006).

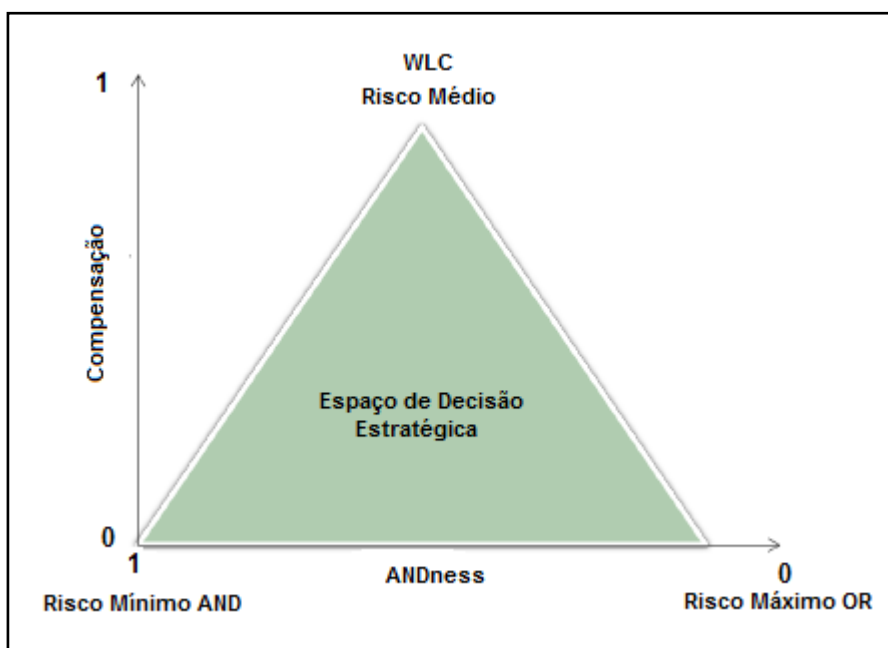


FIGURA 39 - Espaço de estratégia para tomada de decisão. FONTE: Valente e Vettorazzi (2005). Adaptado pelo autor.

Como na Combinação Linear Ponderada, os fatores padronizados, com seus respectivos pesos de importância relativa, gerados pela ponderação AHP (*Analytical Hierarchy Process*) são utilizados, entretanto, um segundo conjunto de pesos é atribuído, denominado pesos de ordenação (*order weights*), com o propósito de controlar o nível de compensação entre os fatores e o grau de risco associado à tomada de decisão.

Após a aplicação do primeiro conjunto de pesos aos fatores, utilizado na WLC, os pesos resultantes são ordenados do valor mais baixo para o mais elevado. Ao fator com o peso mais baixo (o primeiro da lista ordenada) é aplicado o primeiro peso de ordenação, ao fator com o segundo valor mais baixo é aplicado o segundo peso, e assim sucessivamente. A atribuição de pesos está associada à ordem dos fatores, do mínimo para o máximo. É importante ressaltar que nessa etapa, os pesos de ordenação não estão associados às características específicas de cada fator e sim a sua posição dentro da matriz de ordenação.

Estabelecido à ordem dos fatores, o próximo passo é a atribuição dos pesos de ordenação para cada fator. Se para o segundo conjunto de pesos de ordenação os valores forem atribuídos regularmente, ou seja, o mesmo peso para cada fator que some 1 (nessa pesquisa, $1/7=0,142$) o resultado será idêntico à WLC, compensação plena e risco médio. Caso seja atribuído peso total ao fator individual com o escore de potencialidade mínimo, nosso resultado seria muito parecido com o obtido na operação AND da MCE *Booleana*. Portanto, estes métodos são subconjuntos da OWA. Entretanto, a OWA oferece uma série quase infinita de possibilidades de modelagem, conforme atribuição de valores considerando a compensação e o risco entre os fatores. (EASTMAN, 1998).

A maneira como os fatores serão compensados é que controla o modo de como o operador (OWA) agrega os fatores, no *continuum* entre os extremos (AND e OR). (EASTMAN; JIANG, 1996). Se a maior parte dos pesos de ordenação dentro do Espaço Estratégico de Decisão for assinalada à esquerda, à direita ou ao centro, isto irá determinar a posição na dimensão de risco assumido, no processo de tomada de decisão. (MALCZEWSKI, 1999).

Ramos e Mendes (2001) acrescentam que o deslocamento relativo dos pesos de ordenação no sentido do mínimo ou do máximo controla o nível de risco (designado por *ANDness*), onde a homogeneidade de distribuição dos pesos de ordenação pelas posições controla o nível global de compensação (*trade-off*).

De acordo com Jiang e Eastman (2000)³⁸ *apud* Valente (2005, p. 53-54) os parâmetros *ANDness* e *ORness* (risco assumido) e *trade-off* (compensação) caracterizam a natureza da Média Ponderada Ordenada. (Fórmulas 1, 2 e 3).

$$ANDness (RISCO) = (1/n-1) \sum [(n - i)Wi] \dots\dots\dots(1)$$

$$ORness = 1 - ANDness; \dots\dots\dots(2)$$

$$Trade-off (COMPENSAÇÃO) = 1 - \sqrt{\frac{n \sum i \left(Wi - \frac{1}{n} \right)^2}{n-1}} \dots\dots\dots(3)$$

Onde:

n: número total de fatores;

i: ordem do fator;

W: peso de ordenação do fator.

Quanto à distribuição dos pesos de ordenação, Dalmas (2008) explica que a soma de todos os pesos ordenados deve ser “um” e quando este valor é atribuído ao fator de menor influência no processo anterior de ponderação (módulo *WEIGHT*) a solução é de baixo risco (lógica AND). Neste caso, cada fator é considerado importante, mas não o suficiente por si só no resultado final. Na situação inversa, quando o valor total dos pesos (um) é atribuído ao fator de maior influência, solução de análise de alto risco (lógica OR), cada critério é suficiente por si próprio para moldar o resultado final, sem sofrer influência de outros critérios.

Na determinação dos pesos de ordenação foi considerado o risco assumido no processo de tomada de decisão, determinado pela fórmula *ANDness*. Baseando-se na proposta de Valente e Vettorazzi (2005, p. 55) considerou-se duas vezes o intervalo de confiança de 10% a partir do risco médio (equivale a 0,5 no *continuum* de risco no Espaço de Decisão Estratégica) para caracterizar os intervalos de risco, conforme TABELA 8.

³⁸ JIANG, H.; EASTMAN, J. R. Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, v.14, n.2, p. 173-184, 2000.

TABELA 8 - RISCO ASSUMIDO PARA A TOMADA DE DECISÃO

Intervalo de Risco	Risco Assumido
0,00 – 0,40	Alto
0,40 – 0,50	Médio/Alto
0,50 – 0,60	Médio/Baixo
0,60 – 1,00	Baixo

FONTE: Valente e Vettorazzi (2005).

Para a operacionalização da Média Ponderada Ordenada, o software IDRISI TAIGA dispõe no módulo *Multi Criteria Evaluation* – MCE a função *Ordered Weighted Average* (FIGURA 40).

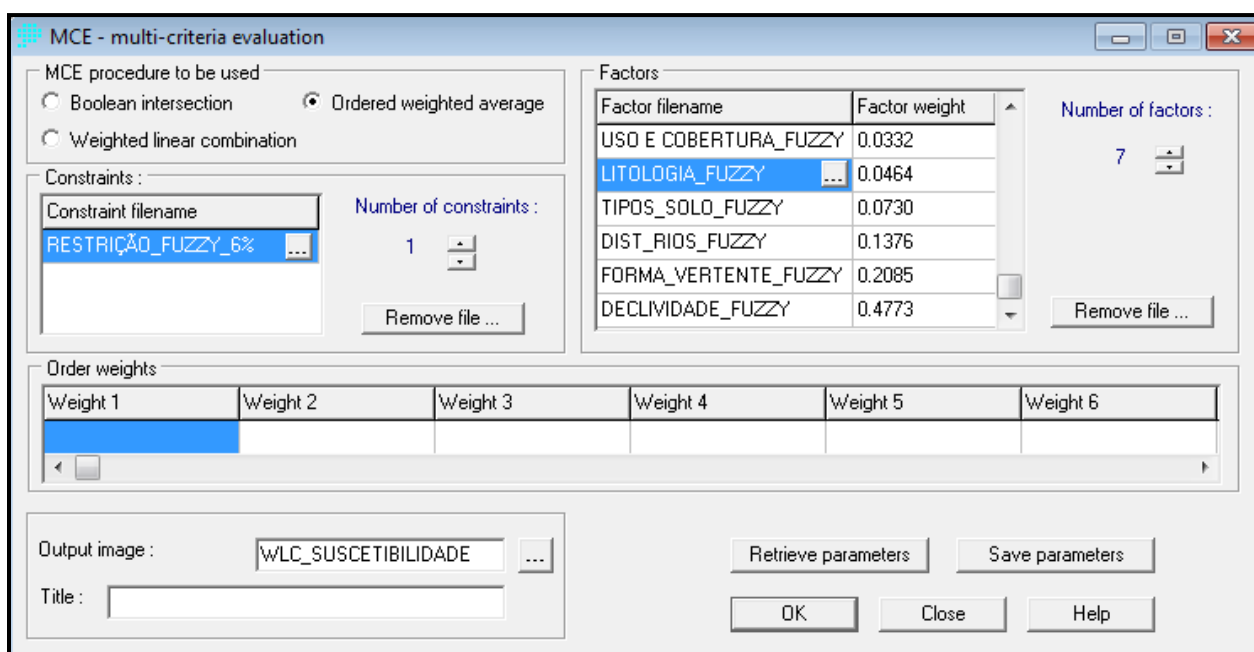


FIGURA 40 - Módulo de Avaliação Multicritério – MCE. Método: Média Ponderada Ordenada - OWA.
FONTE: Software IDRISI TAIGA. Org.: O autor (2014).

4.2.6 Desvio Quartílico

Tanto na Combinação Linear Ponderada quanto na Média Ponderada Ordenada os resultados (mapas finais) são apresentados em grade numérica que representa a variação contínua da grandeza suscetibilidade, com valoração entre 0 e 255 (*bytes*) e para facilitar a análise foi realizada a reclassificação dessa escala pelo método do desvio quartílico, o qual de acordo com Ramos e Sanchez (2000) divide a

série de dados em quatro grupos com igual número de ocorrências, cada um compreendendo 25% do total de valores. Desta forma, o fatiamento foi definido quantitativamente, excluindo a subjetividade no processo de definição do limiar de corte e os cenários categorizados.

4.2.7 Validação dos resultados

Por meio do procedimento de retroanálise, as ocorrências reais mapeadas, registradas na paisagem em forma de cicatrizes nas vertentes de março de 2011 serviram como base para o cruzamento com os modelos gerados e verificação dos índices de coincidência entre as classes de suscetibilidade estabelecidas com as zonas de origem dos movimentos de massa.

No mapeamento (FIGURA 41), com base na imagem de satélite *WorldView1* (DIGITALGLOBE, 2011), resolução espacial de 0,6 metros, datada do dia 05 de maio de 2011, disponibilizada por Silveira *et al.* (2013), foram registradas de 288 cicatrizes, equivalente a 2,06 km² ou 5,14% de área da bacia hidrográfica.

Após a comparação entre os cenários gerados e o inventário, mapeamento de cicatrizes, com o propósito de conferir e confirmar a congruência entre as diferentes classes de suscetibilidade determinadas na modelagem e as condições de instabilidade reais da paisagem, a próxima etapa consistiu na checagem em campo, com pontos de controle preestabelecidos e georreferenciados, para averiguação e demonstração dos resultados.

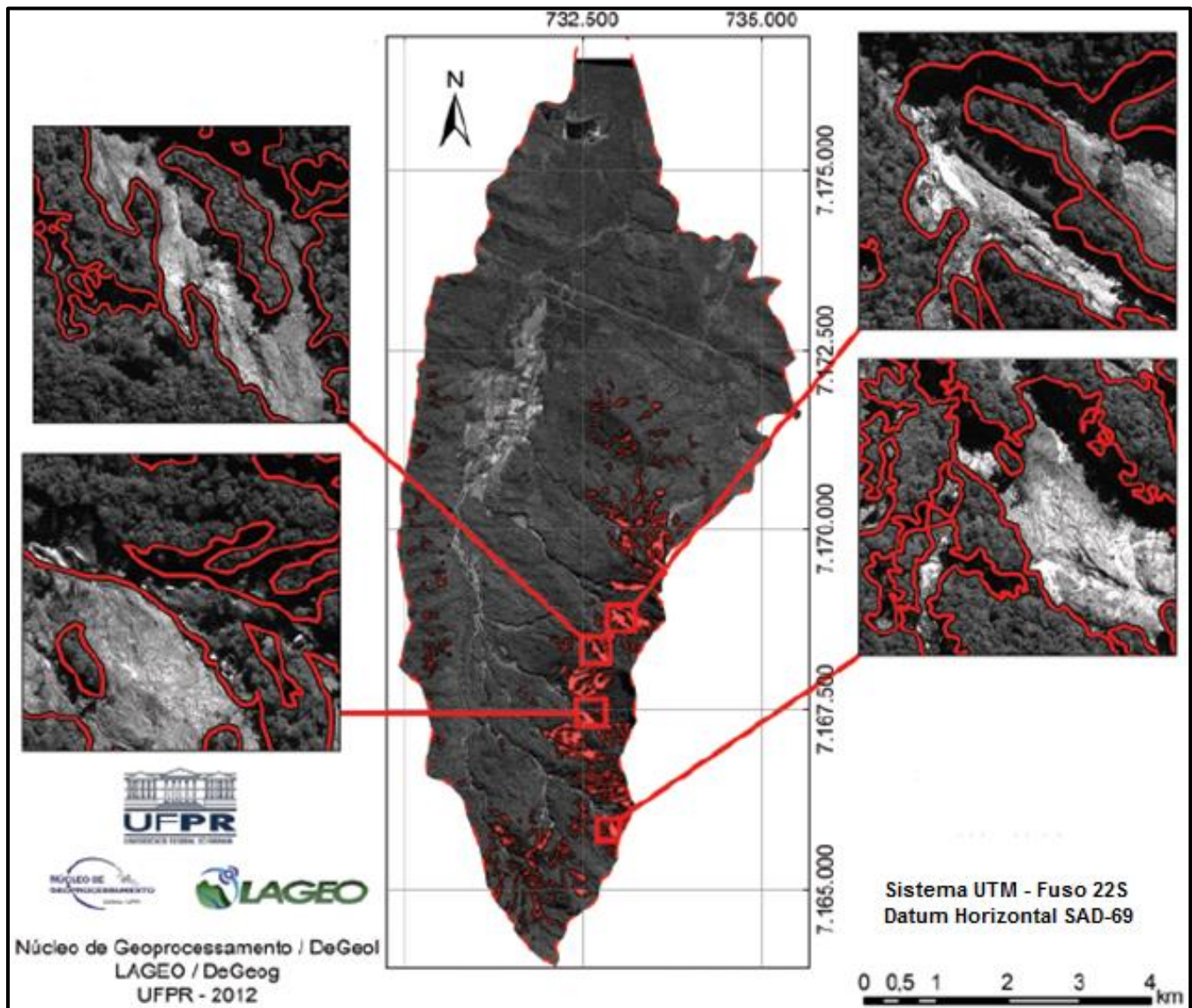


FIGURA 41 - Delimitação das cicatrizes com zonas de origem dos movimentos de massa (escorregamentos, queda e rolamento de blocos) utilizando-se de imagem orbital. FONTE: Imagem de satélite WordView 1, imageamento em 05 de maio de 2011. Org.: Silveira *et al.* (2013).

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 MAPAS PADRONIZADOS

Após a padronização *Fuzzy* aplicada a todos os fatores individualmente, o resultado foi um conjunto de Planos de Informação PI's em escala contínua de valores comuns, entre 0 (mínima suscetibilidade) e 255 (máxima suscetibilidade) adaptados às funções de pertinência *Fuzzy*, de acordo com os parâmetros utilizados e conforme suas características específicas inerentes, ficando estes, adequados à integração e combinação pelos métodos de Avaliação Multicritério, Combinação Linear Ponderada (WLC) e Média Ponderada Ordenada (OWA) propostos.

É importante salientar que foi adotada a restrição declividade inferior a 6% admitindo que as zonas de origem dos movimentos de massa (escorregamentos, queda e rolamento de blocos) não ocorrem em terrenos com inclinação no intervalo de 0 a 6%, isto com o propósito de evitar possíveis inconsistências como, por exemplo, uma determinada classe de uso da terra ser indicada como suscetível mesmo sendo localizada em uma área totalmente plana.

Como primeiro resultado da pesquisa os PI's padronizados e suas respectivas características são descritos a seguir:

✓ **Declividade *Fuzzy*:** o PI individual de declividade padronizado demonstrou que o nível de suscetibilidade para este fator na bacia hidrográfica é relativamente elevado, 1949,5 hectares ou 47,20% da área da bacia tem declividade acima de 25% sendo que 615 hectares ou 14,90% da área total apresenta declividade acima de 45%. Com a utilização da função sigmoideal crescente e pontos de controle adotados entre 25% e 45% de declividade nas encostas, assumindo que a partir de 25% as encostas se tornam mais propensas aos movimentos de massa estabilizando-se com alta suscetibilidade em 45%, constatou-se que as áreas mais propensas encontram-se na margem direita do rio Jacareí, porções leste, sudeste e sul, onde se localizam as nascentes junto a Serra da Prata. Por outro lado, a margem esquerda, porções oeste e sudoeste, apresenta extensão menor de terreno com suscetibilidade elevada para este

condicionante. As porções, central e norte apresentam terreno com baixa declividade, área de planície de inundação, onde ocorre predomínio de deposição (FIGURA 42 - A).

✓ **Altitude Fuzzy:** utilizando-se da função sigmoidal crescente, com pontos de controle em a:200m e b:500m, a padronização *Fuzzy* referente a esta variável resultou em um PI onde é demonstrada concentração das maiores amplitudes altimétricas na porção sul e sudeste da bacia, indicando as áreas mais suscetíveis, ao considerar este fator individualmente. A referente padronização indica que a partir dos 200m de altitude ocorre grau de suscetibilidade maior atingindo níveis elevados e mantendo-se assim a partir dos 500m, conforme parâmetros adotados (FIGURA 42 - B).

✓ **Forma das Vertentes Fuzzy:** ao adotar a função sigmoidal decrescente com pontos de controle em c:-0.18°/m e d:0.34°/m assumiu-se que os valores positivos, representado as vertentes convexas, indicam áreas com menor suscetibilidade, os valores negativos, que indicam as vertentes côncavas, apresentam maior suscetibilidade e os valores nulos ou próximos de zero, as vertentes retilíneas, de suscetibilidade média, conforme proposto em trabalho de Valeriano (2008). A padronização deste fator resultou em um PI indicando predominância de suscetibilidade média, com pontos de alta suscetibilidade distribuídos irregularmente por toda a bacia. Para evitar possíveis inconsistências nos resultados, considerando este condicionante, a restrição declividade inferior a 6%, impediu que as áreas planas e/ou com baixo declive, pontos de deposição, fossem apresentadas erroneamente com algum grau de suscetibilidade em função da curvatura (FIGURA 42 - C).

✓ **Distância dos Rios Fuzzy:** assim como no condicionante anterior a função de pertinência adotada para a distância dos rios foi a sigmoidal decrescente com pontos de controle em c:0m e d:50m, assumindo que a suscetibilidade é maior nas proximidades dos canais fluviais. Desta forma, criou-se um PI com uma faixa contínua ao longo dos rios indicando áreas de instabilidade (FIGURA 42 - D).

✓ **Tipos de Solo Fuzzy:** a padronização do fator tipos de solo, de acordo com a valoração atribuída às diferentes classes que compõem a bacia em análise e posterior adequação a função de pertinência *Fuzzy* linear crescente, com pontos de controle em a:50 e b:255 gerou um PI indicando predomínio das categorias mais suscetíveis às ocorrências dos movimentos de massa no terço médio da bacia, em declividades

variando de 20 a 40% e altitudes inferiores aos 300 metros, onde concentram-se solos com elevados teores de argila (FIGURA 42 - E).

✓ **Litologia *Fuzzy*:** a padronização deste fator condicionante exigiu a atribuição de valores diretos para cada classe litológica, conforme suas características intrínsecas, que lhe confere maior ou de menor suscetibilidade aos movimentos de massa, para que depois houvesse a adequação para a função de pertinência *Fuzzy* linear crescente com pontos de controle em a:100 e b:255. Como os valores atribuídos no processo de padronização assumiu que as formações rochosas menos coesas apresentam maior vulnerabilidade, o PI resultante demonstrou predominância das classes mais suscetíveis na planície de inundação e também em alguns pontos de fundo do vale do Rio Jacareí, áreas com concentração depósitos alúvio-coluvionares e tálus (FIGURA 42 – F).

✓ **Uso Ocupação da Terra e Cobertura Vegetal *Fuzzy*:** o PI padronizado de uso da terra e cobertura vegetal também exigiu primeiramente, a atribuição de valores diretos para cada categoria, para que, assim como os condicionantes anteriores, se adequasse à função de pertinência *Fuzzy* linear crescente com pontos de controle em a:0 e b:255. Este procedimento resultou em um PI que demonstrou predominância de baixa suscetibilidade para maior parte da bacia hidrográfica, constatação justificada pela preponderância da classe Floresta Ombrófila Densa em estágio médio ou avançado que controla eficientemente o escoamento superficial e a infiltração das águas no manto de intemperismo, diminuindo possível encharcamento do solo e consequentemente resultando em maior estabilidade das vertentes. O baixo grau de ocupação da bacia, com predomínio de pequenas propriedades agrícolas limitando-se à planície de inundação, contribui no sentido da manutenção da estabilidade dos terrenos (FIGURA 42 - G).

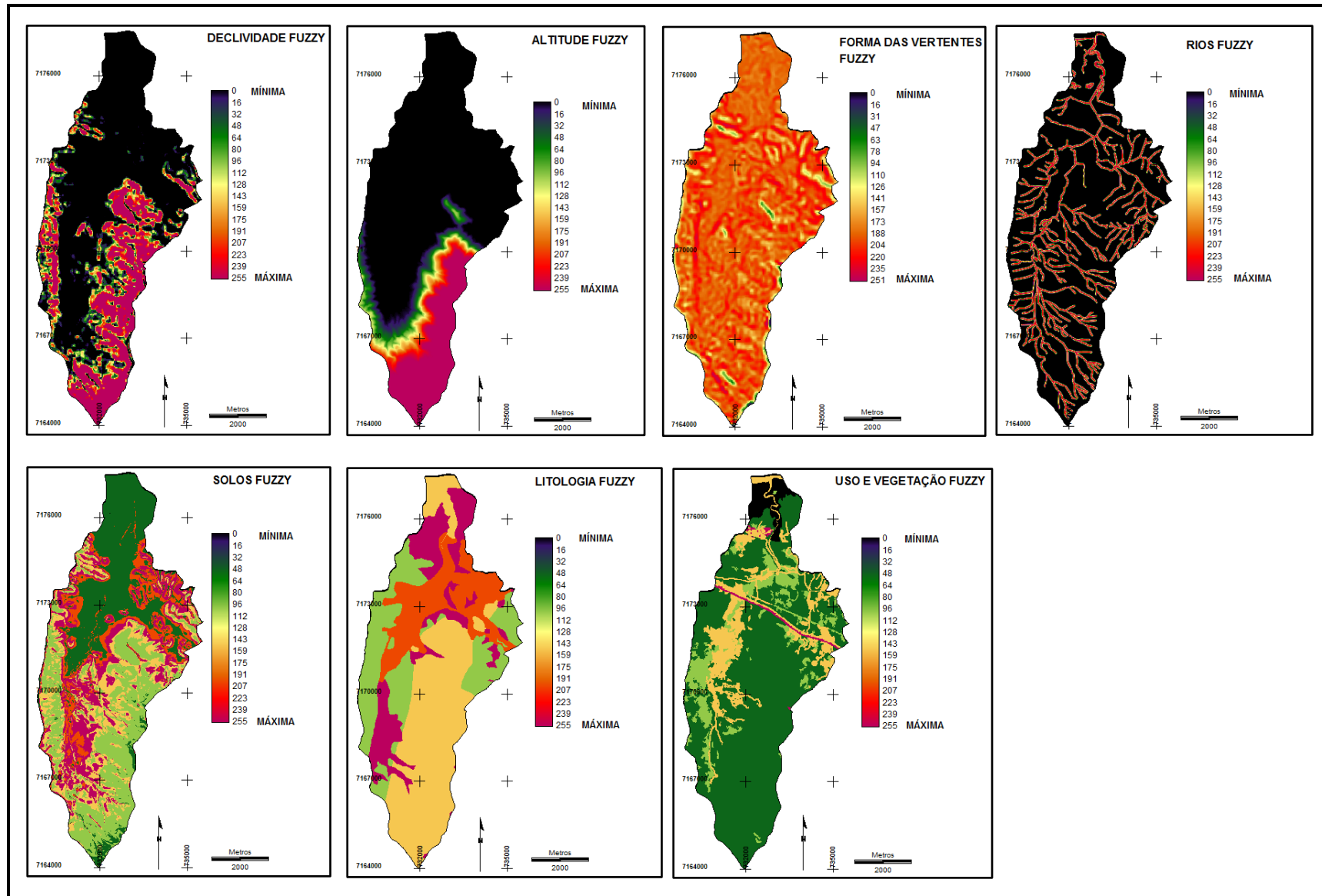


FIGURA 42 - Cartograma com os PI's da Padronização Fuzzy: A – Declividade; B – Altitude; C – Forma das Vertentes; D – Distância dos Rios; E – Tipos de Solo; F – Litologia; G - Uso da Terra e Cobertura Vegetal. FONTE: Folha Topográfica Alexandra (1998); MINEROPAR (2011). Org.: O autor (2014).

5.2 CENÁRIO DE SUSCETIBILIDADE GERADO PELA COMBINAÇÃO LINEAR PONDERADA (*WEIGHTED LINEAR COMBINATION – WLC*)

O mapa resultante da Combinação Linear Ponderada (FIGURA 43) demonstra a variação dos níveis de suscetibilidade em que cada pixel representa o valor recebido em todo o processo de combinação e agregação que considerou os critérios condicionantes padronizados e com seus respectivos pesos de importância relativa. Os pixels com maiores valores, representados com cores avermelhadas indicam as áreas que apresentam maior suscetibilidade aos movimentos de massa, zonas de origem dos processos e os pixels com valores tendendo a 0 na cor preta, representam os locais com baixa suscetibilidade.

Como a Combinação Linear Ponderada faz a total compensação entre os fatores, os escores de suscetibilidade se apresentaram com níveis medianos, uma vez que houve influência equivalente entre todos os condicionantes envolvidos no processo, limitando o nível máximo de suscetibilidade ao valor de 240, na escala de variação entre 0 a 255. Nesse caso, um fator com característica de instabilidade em um determinado local pôde ser atenuado por outro fator que se apresenta estável nesse mesmo local e vice-versa.

Adaptando o procedimento do desvio quartílico **item 4.2.6**, tendo em vista que parte da bacia hidrográfica foi suprimida da análise por ser considerada estável, deste modo, a imagem original foi dividida em cinco categorias: Sem Suscetibilidade, área correspondente a restrição (declividade inferior a 6%); Baixa Suscetibilidade com intervalo de 1 a 63; Moderada Suscetibilidade entre 63 a 127; Alta Suscetibilidade entre 127 a 191 e Muito Alta Suscetibilidade com intervalo entre 191 a 255.

Ressalta-se neste procedimento, que os terrenos com declividades inferiores a 6% foram classificadas como restrições absolutas e isolados da análise, 733,74 hectares ou 17,78% de área da bacia se apresentaram nestas condições.

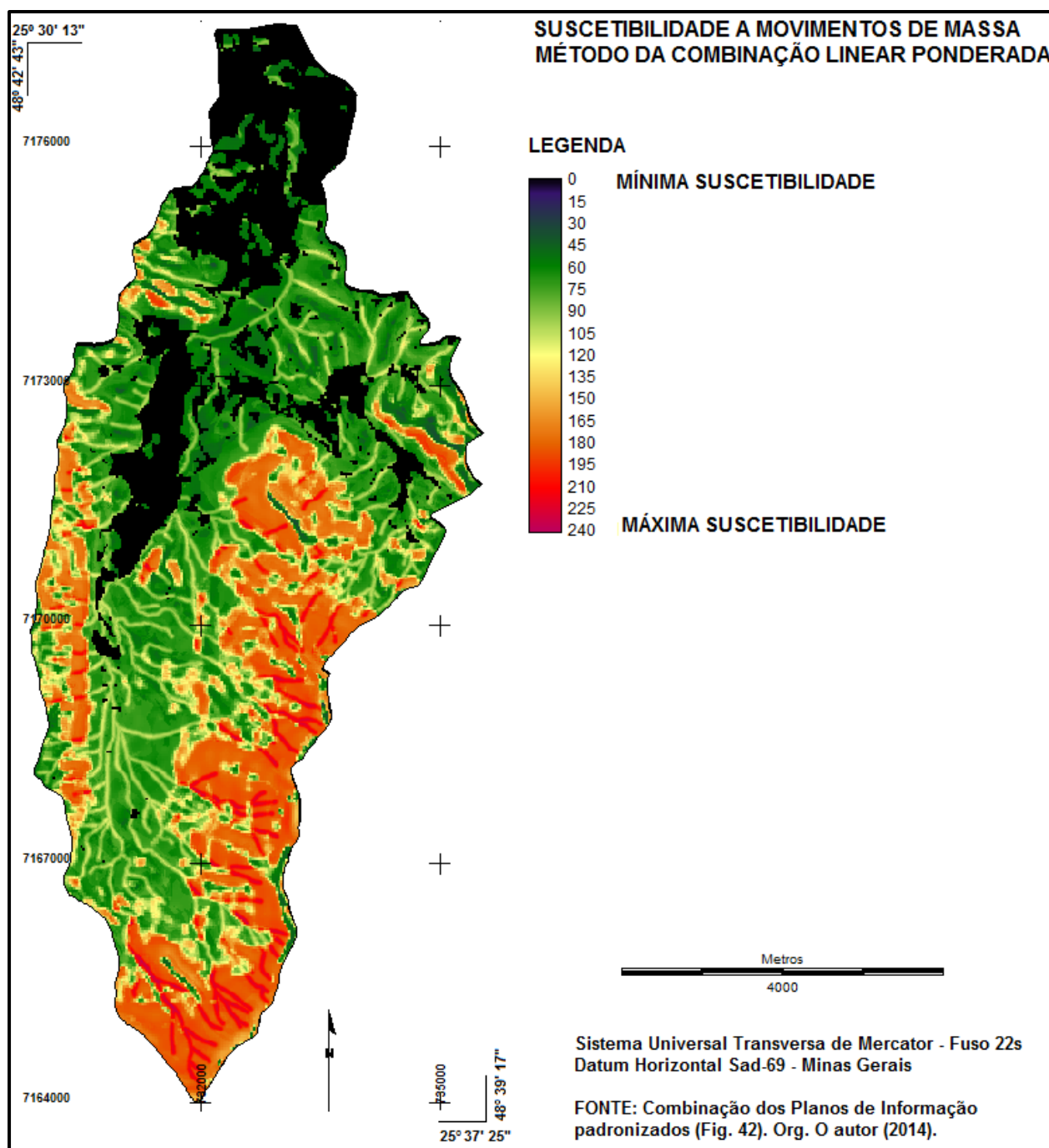


FIGURA 43 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Jacaréi pelo método da Combinação Linear Ponderada. FONTE: Agregação e combinação dos Planos de Informação padronizados (fatores), Figura 42. Org.: O autor (2014).

A divisão em categorias para o restante da área (3394,17 ha ou 82,22%) foi executada pelo módulo *RECLASS*, do *Software* IDRISI TAIGA, resultando no mapa síntese com diferentes classes de suscetibilidade aos movimentos de massa,

especificamente as zonas propensas à origem dos processos, quais sejam: escorregamentos (translacionais e rotacionais), quedas e rolamento de blocos (FIGURA 44).

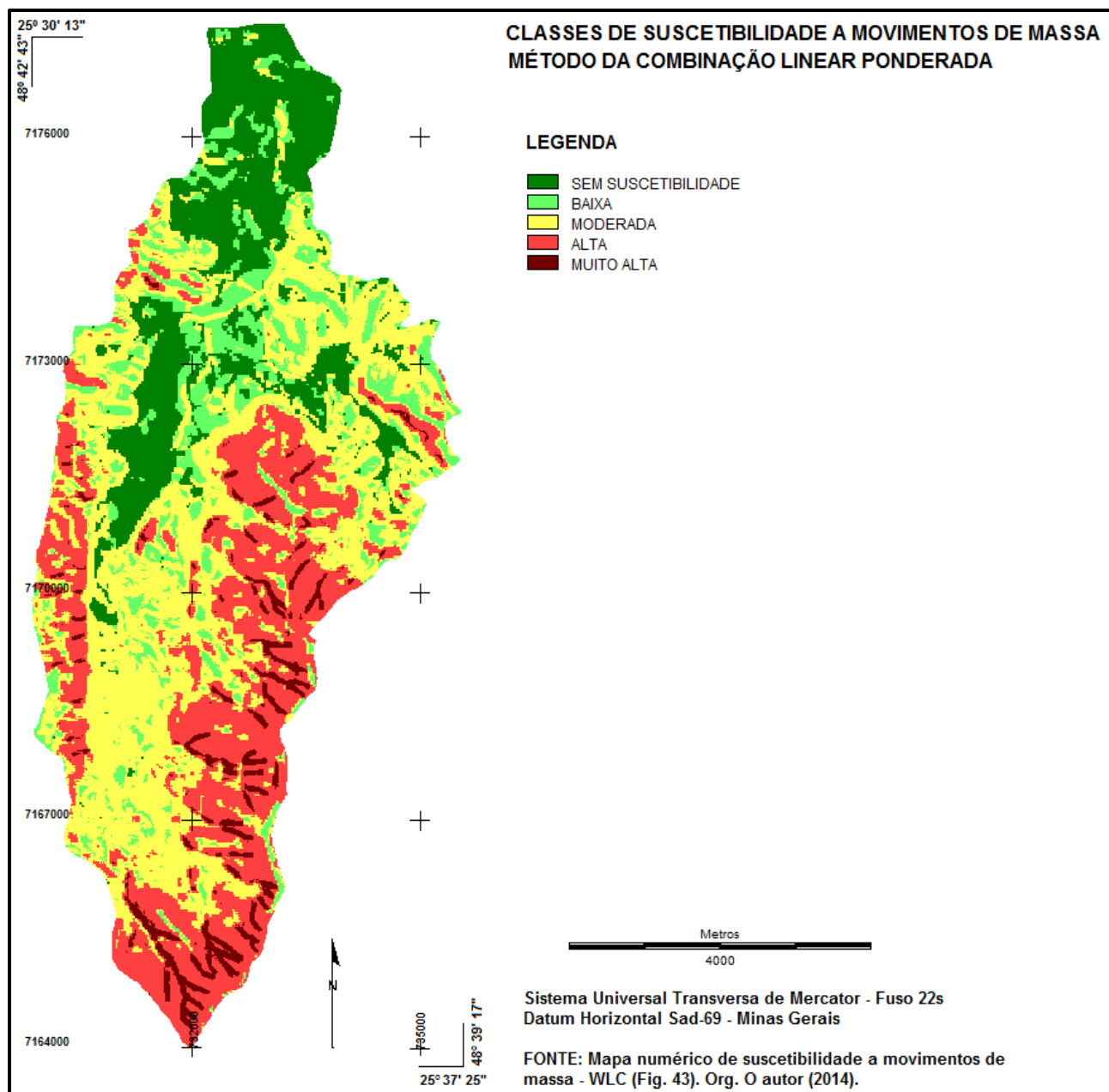


FIGURA 44 - Mapa com diferentes classes de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí pelo método da Combinação Linear Ponderada. FONTE: Mapa numérico de suscetibilidade a movimentos de massa WLC, Figura 43. Org.: O autor (2014).

A análise do mapa (FIGURA 44) com cinco classes de suscetibilidade permitiu inferir que houve predomínio das classes Moderada e Baixa Suscetibilidade, localizadas

principalmente, no terço médio e na planície de inundação, respectivamente. As classes descritas representam 52,67% da bacia, se considerada também a restrição declividade inferior a 6%, áreas categorizadas como Sem Suscetibilidade, este índice sobe para 70,45%. As classes Alta e Muito Alta Suscetibilidade, neste cenário, representam 29,55% (TABELA 9).

TABELA 9 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE DA ÁREA DE ESTUDO. CENÁRIO DA COMBINAÇÃO LINEAR PONDERADA.

Classes de Suscetibilidade	Área (ha)	%
Sem Suscetibilidade	733,74	17,78
Baixa	549,52	13,31
Moderada	1624,76	39,36
Alta	1049,64	25,42
Muito Alta	170,24	4,13
Total	4127,91	100

FONTE: O autor (2014).

Destaca-se neste método, que os pesos de cada critério considerados baixos ou elevados tendem a se aproximar de uma média, de modo que a total compensação (1) tem como característica principal a de gerar modelos homogeneizados.

Comparando as categorias obtidas pela Avaliação Multicritério, Combinação Linear Ponderada e o referido mapa de cicatrizes (FIGURA 41), por meio do módulo CROSSTAB (tabulação cruzada) do *Software* IDRISI TAIGA, verificou-se que houve 80,13% de coincidência das cicatrizes, ou seja, dos processos ocorridos, com as classes identificadas como Alta 61,01% e Muito Alta Suscetibilidade 19,12%, com maior concordância na margem direita do Rio Jacareí.

Na margem direita estão as nascentes a leste e sudeste da bacia, no compartimento geológico com predomínio de rochas graníticas, denominado Serra da Prata, com relevo acidentado, predomínio de declives acima de 45%, altitudes superiores aos 500m e proximidade dos canais fluviais, onde houve concentração dos processos ocorridos em março de 2011.

Como a área de estudo é reconhecida pela sua fragilidade ambiental, mesmo tendo sido obtido um nível de aproximadamente 80% de coincidência entre as classes Alta e Muito Alta Suscetibilidade com as cicatrizes mapeadas pós-episódio de 2011 é possível que a compensação global dos fatores pelo método WLC, baseada nas

médias, a qual coloca a análise sob a perspectiva de que não ocorra nenhum risco e nenhum extremo de aversão ao risco associado à tomada de decisão, tenha generalizando a modelagem, uma vez que os pesos de cada critério considerados muito altos ou muito baixos se aproximaram de uma média completa, influenciando variáveis mais relevantes, que teoricamente, não necessitariam de compensação total.

Neste contexto, esperava-se ser possível com a Média Ponderada Ordenada, onde a característica principal é permitir maior controle do risco e da compensação, a obtenção de resultados ainda mais consistentes.

5.3 CENÁRIOS DE SUSCETIBILIDADE GERADOS PELA MÉDIA PONDERADA ORDENADA (*ORDERED WEIGHTED AVERAGE – OWA*)

A partir da compreensão do Espaço de Decisão Estratégica (FIGURA 39), visando à obtenção de resultados diferentes ao da Combinação Linear Ponderada foram gerados outros cenários, variando os níveis de risco e compensação dos fatores. Este procedimento foi utilizado, diante do reconhecimento de que para a ocorrência dos movimentos de massa, alguns condicionantes se sobrepõem a outros e a atribuição dos pesos de ordenação possibilita a valorização dessa característica.

Em linhas gerais, quando se assume risco total ($ANDness=0$) reconhece-se que os fatores envolvidos representam por si só significância direta, sendo estes suficientes para moldar o resultado final, deixando em segundo plano o processo de compensação. Entretanto, ao assumir o risco mínimo ($ANDness=1$), considera-se que para a indicação de potencialidade em uma determinada área (no caso desta pesquisa a instabilidade das encostas), todos os fatores envolvidos deverão apresentar em conjunto níveis elevados para aquele local, não sendo estes relevantes quando considerados individualmente. Ressalta-se que, variando os pesos de ordenação dentro do Espaço de Decisão Estratégica, conforme anteriormente relatado, alteram-se os níveis de compensação e risco e um novo cenário é produzido, sendo praticamente infinitas as possibilidades de combinação.

Nessa etapa, a tarefa principal foi aferir uma agregação que representasse um modelo final com resultados mais coincidentes com as ocorrências reais, registradas no inventário, mapeamento das cicatrizes dos eventos de março de 2011, “mantendo a

maior compensação possível e risco entre 0,45 e 0,38” (CALIJURI, 2013)³⁹. Os pesos de ordenação para a geração dos cenários de suscetibilidade são apresentados na TABELA 10 que se enquadram no Espaço de Decisão Estratégica (FIGURA 45). A padronização e ponderação dos critérios é a mesma adotada para a Combinação Linear Ponderada (TABELA 7), (QUADRO 6).

TABELA 10 – PESOS DE ORDENAÇÃO PARA OS FATORES UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO, PELO MÉTODO DA MÉDIA PONDERADA ORDENADA (OWA). C1 = CENÁRIO 1 (AND), RISCO MÍNIMO, NENHUMA COMPENSAÇÃO; C2 = CENÁRIO 2 (OR), RISCO MÁXIMO, NENHUMA COMPENSAÇÃO; C3 = CENÁRIO 3 (WLC), RISCO MÉDIO, COMPENSAÇÃO TOTAL; C4 = CENÁRIO 4, RISCO MÉDIO/BAIXO, COMPENSAÇÃO PARCIAL; C5 = CENÁRIO 5, RISCO MÉDIO/ALTO, COMPENSAÇÃO PARCIAL.

Pesos De Ordenação	Peso 1	Peso 2	Peso 3	Peso 4	Peso 5	Peso 6	Peso 7	Risco	Comp.
C1 (AND)	1	0	0	0	0	0	0	1.0	0
C2 (OR)	0	0	0	0	0	0	1	0	0
C3 (WLC)	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.5	1
C4	0.20	0.15	0.15	0.15	0.15	0.10	0.10	0.57	0.90
C5	0.10	0.10	0.15	0.15	0.15	0.15	0.20	0.43	0.90

Org.: O autor (2014).

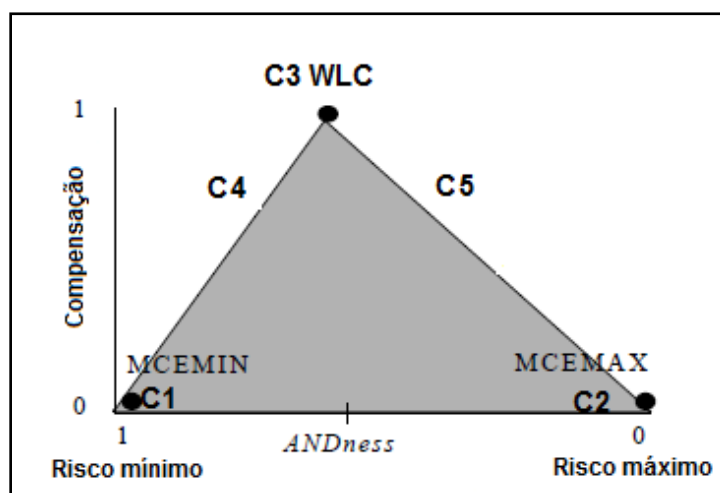


FIGURA 45 - Espaço de estratégia para tomada de decisão indicando a posição dos cenários gerados: C1(AND) = Risco Mínimo, Nenhuma Compensação; C2 (OR) = Risco Máximo, Nenhuma Compensação; C3 (WLC) = Risco Médio, Compensação Total; C4 = Risco Médio/Baixo, Compensação Parcial; C5 = Risco Médio/Alto, Compensação Parcial. FONTE: Eastman 1998 p. 195. Adaptado pelo autor.

³⁹ CALIJURI, M. L. Comunicação via e-mail em setembro de 2013.

Como descrito anteriormente, se os pesos atribuídos aos fatores são distribuídos igualitariamente, dentro do Espaço de Decisão Estratégica, tem-se a compensação total e risco médio. Entretanto, se os maiores pesos forem atribuídos à esquerda, o resultado é uma ação conservadora, pois admite baixo risco e à medida que os maiores pesos se deslocam para a direita, assume-se um risco maior, caracterizando-se como uma ação mais arrojada e obviamente que a variação nos pesos interfere também na compensação. Como resultado cartográfico deste procedimento foram obtidos os mapas síntese de suscetibilidade da Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré pela Média Ponderada Ordenada, variando o risco e a compensação.

Com o controle possível pelo método, construiu-se o Cenário 1, com risco mínimo (*ANDness 1* ou *ANDtotal*) e nenhuma compensação entre os critérios (*trade-off 0*). O resultado foi um mapa (FIGURA 46) com níveis baixíssimos de suscetibilidade, uma vez que nesse procedimento, para que haja níveis elevados em um determinado local (*pixel*), todos os fatores devem apresentar individualmente elevado potencial naquele local (*pixel*).

O resultado confirmou a tendência de que a solução *ANDtotal* leva a minimização quase integral das características de instabilidade das vertentes. O maior índice de suscetibilidade calculado para a bacia foi de 100 na escala de 0 a 255. Pontos com algum grau de suscetibilidade ocorreram apenas nas proximidades dos rios, em declives acentuados. O procedimento demonstrou ineficiência ao representar a realidade espacial, constatada a partir de visitas a campo e análise dos mapas base individuais.

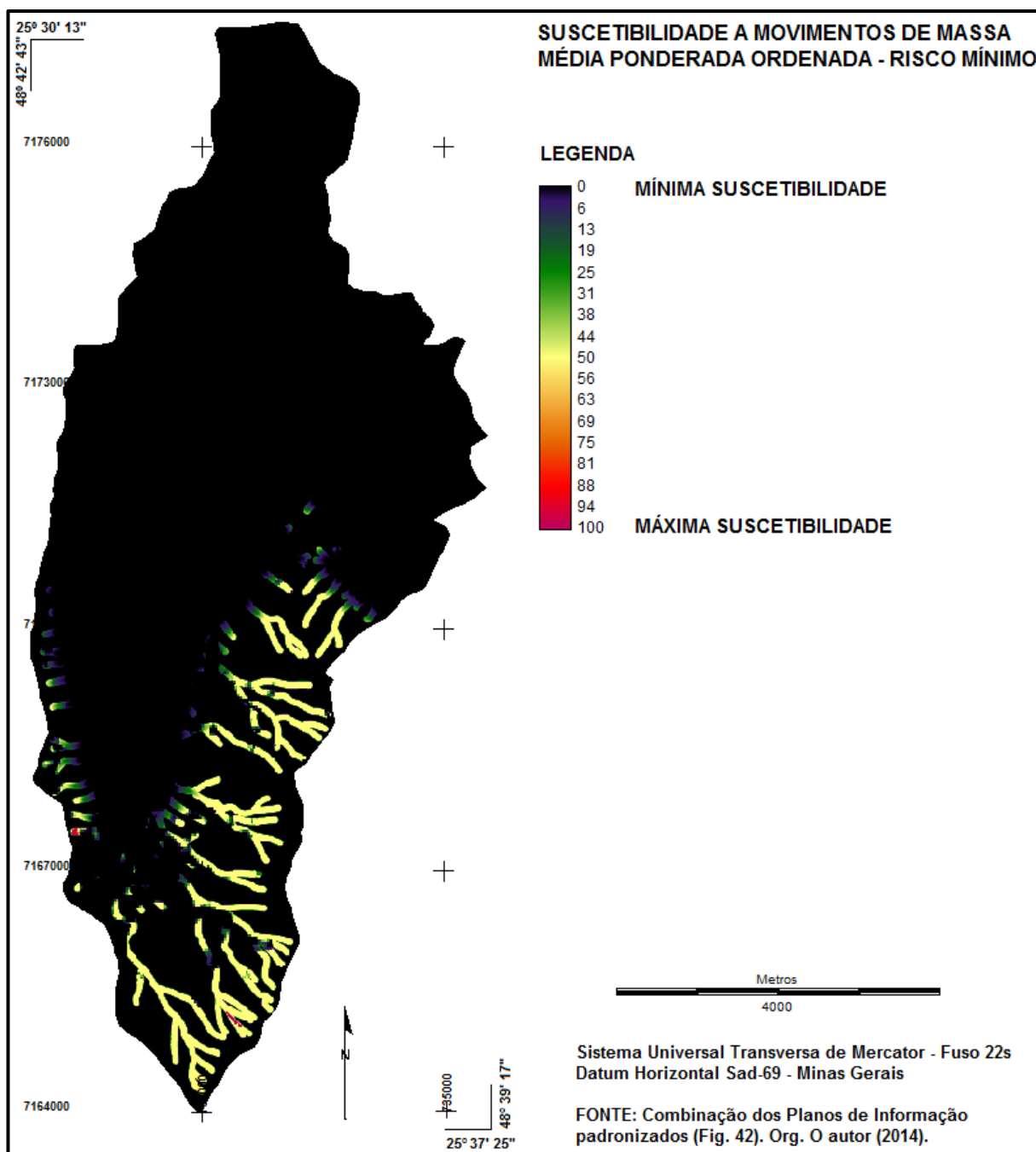


FIGURA 46 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí pela Média Ponderada Ordenada – OWA, com risco mínimo (AND) e sem compensação entre os fatores (Cenário 1). FONTE: Agregação e combinação dos Planos de Informação padronizados (fatores), Figura 42. Org.: O autor (2014).

Ao contrário do anterior, o Cenário 2 (FIGURA 47) com risco máximo (*ANDness 0 ou ORtotal*) e nenhuma compensação, ao assumir que os fatores influenciam individualmente no mapa síntese, sem necessidade de compensação, ou seja, se um fator apresentar escore elevado em um determinado local (*pixel*), este será

representado dessa forma no resultado final, elevou os índices de suscetibilidade em toda a bacia hidrográfica, confirmando a tendência esperada do método, porém demonstrando, assim como no Cenário 1, inconsistência do modelo ao compará-lo com a realidade.

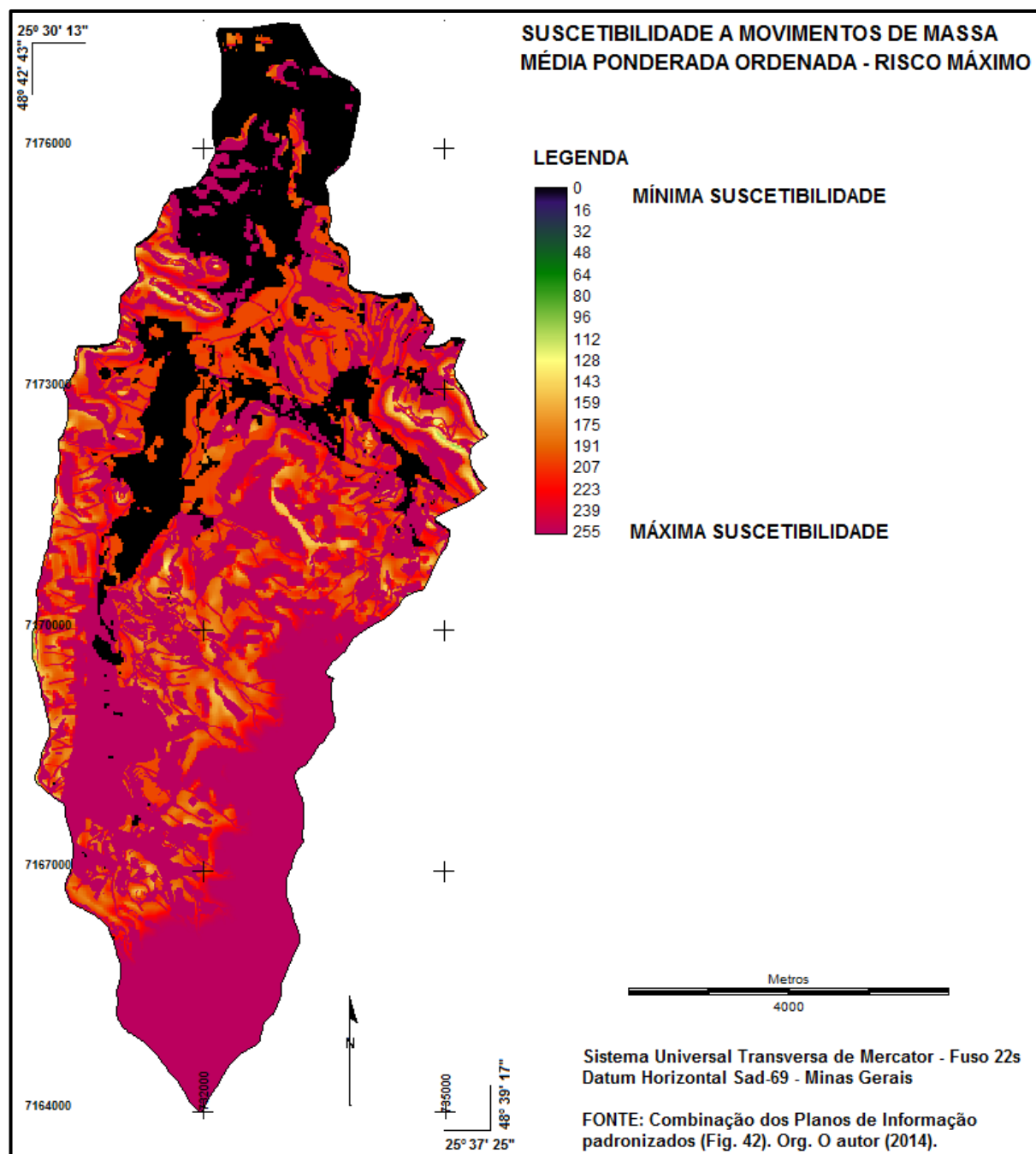


FIGURA 47 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí pela Média Ponderada Ordenada – OWA, com risco máximo (OR) e sem compensação entre os fatores (Cenário 2). FONTE: Agregação e combinação dos Planos de Informação padronizados (fatores), Figura 42. Org.: O autor (2014).

É importante salientar que os dois primeiros cenários construídos com a Média Ponderada Ordenada, risco mínimo e risco máximo, sem nenhuma compensação entre os fatores condicionantes, foram produzidos com intuito de demonstrar as variações extremas, possíveis de obtenção pelo método, assim como a forma com que estas possibilidades se apresentam cartograficamente, sem interesse de confirmar alguma relação com a realidade da paisagem estudada. Portanto, estes mapas não foram submetidos a nenhum processo de validação e/ou comprovação de resultados.

O Cenário 3 em que houve a distribuição equivalente entre os pesos de ordenação, de modo que no total a soma seja 1, ou 0,142 para cada um dos pesos do segundo conjunto (ordenação), resultou em um mapa idêntico ao gerado pela Combinação Linear Ponderada, apresentado no **item 5.2** (FIGURA 43) com risco médio e compensação total entre os fatores, confirmando as expectativas teóricas do método.

O Cenário 4 (FIGURA 48), que assumiu compensação parcial e risco médio/baixo, 0.90 e 0.57 respectivamente, demonstrou a tendência esperada e apresentou como produto, um mapa de suscetibilidade com escores relativamente reduzidos, na escala de 0 a 255 o nível máximo foi de 230. Nesse caso, os locais considerados mais suscetíveis foram suavemente minimizados, manteve-se certa coerência na modelagem, com predomínio de alta suscetibilidade nas elevadas declividades, vertentes côncavas e proximidades dos canais fluviais, sobretudo nas porções sudeste e sul da bacia, em encostas com predomínio dos granitóides da Serra da Prata, nascentes da margem direita da bacia hidrográfica.

Embora o modelo no quarto cenário tenha apresentando coerência nos resultados, ao reclassificá-lo pelo procedimento do desvio quartílico, efetuar a retroanálise com o mapa de inventário das cicatrizes e também compará-lo com os resultados obtidos pelo Cenário da Combinação Linear Ponderada, constatou-se que houve menores índices de acerto. Neste cenário, 68,21% das cicatrizes coincidiram com as classes Alta, 57,09% e Muito Alta, 11,12%.

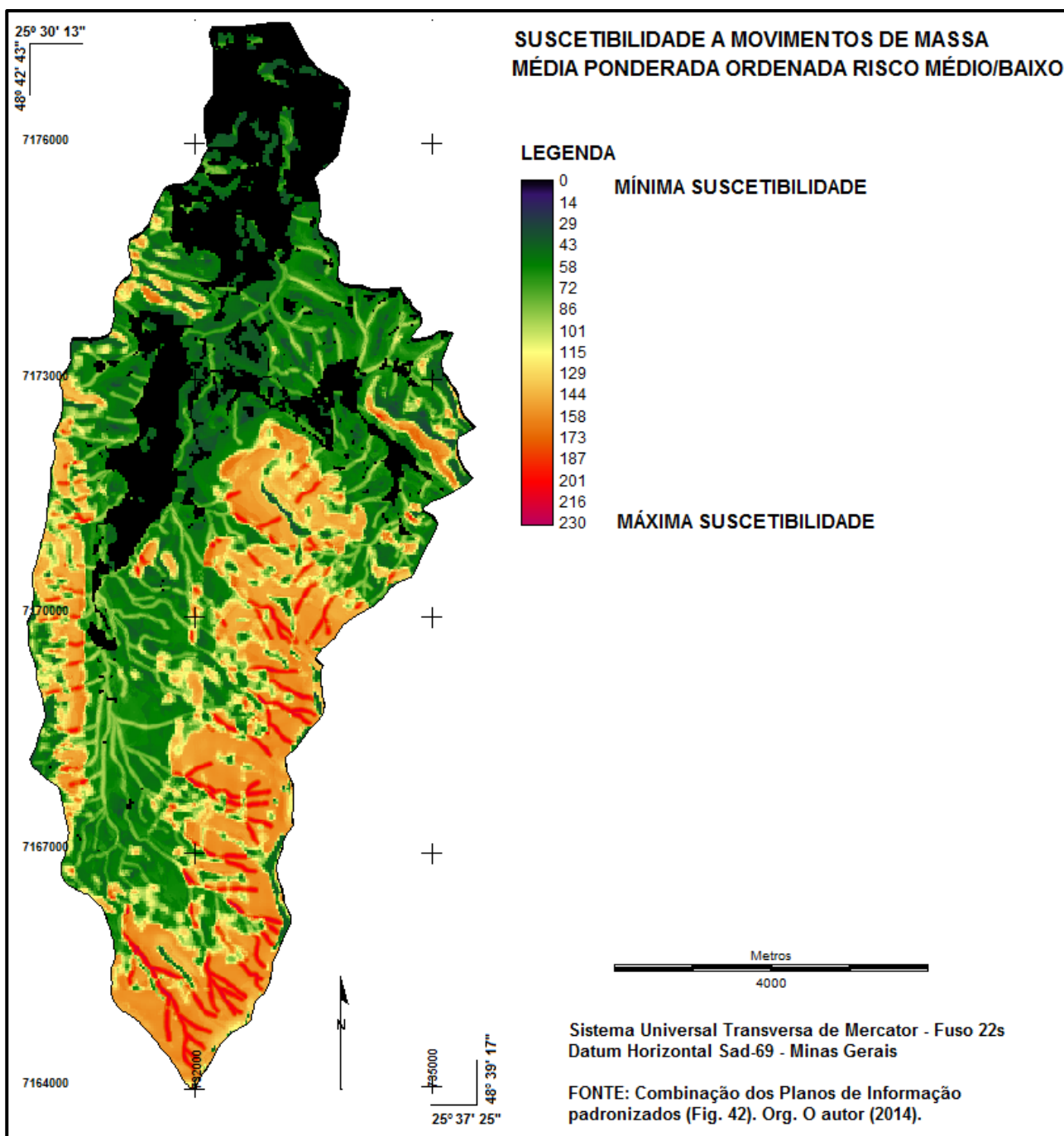


FIGURA 48 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí pela Média Ponderada Ordenada – OWA, com risco médio/baixo e compensação parcial entre os fatores (Cenário 4). FONTE: Agregação e combinação dos Planos de Informação padronizados (fatores), Figura 42. Org.: O autor (2014).

Ainda neste contexto, foi gerado o Cenário 5, com compensação parcial e risco médio/alto, 0.90 e 0.43 respectivamente, na atribuição dos pesos de ordenação. Este

modelo reforçou a expectativa teórica do método e apresentou resultado demonstrando predominância de elevada suscetibilidade nas cabeceiras das encostas, com altitudes elevadas, fortes declividades, encostas côncavas e proximidades dos rios, principalmente nas porções leste, sudeste e sul da bacia, onde se concentraram os movimentos de massa de março de 2011, com escores mais elevados que os cenários anteriores, máximo de 243 na escala de 0 a 255. Algumas características dos condicionantes analisados que influenciam o ambiente e contribuem para a instabilidade das encostas puderam ser valorizadas neste procedimento.

Nessa fase, o conhecimento das particularidades ambientais da área de estudo foi muito importante, pois auxiliou no processo de ajuste dos pesos de ordenação, no sentido de assumir uma decisão um pouco mais arrojada. Com o controle possibilitado pela Média Ponderada Ordenada foram atribuídos pesos de ordenação de modo que os condicionantes mais relevantes garantissem influência maior no produto final (mapa) sem com isso recorrer aos extremos *Booleanos*, mantendo os valores contínuos e o caráter compensatório entre os fatores envolvidos (FIGURA 49).

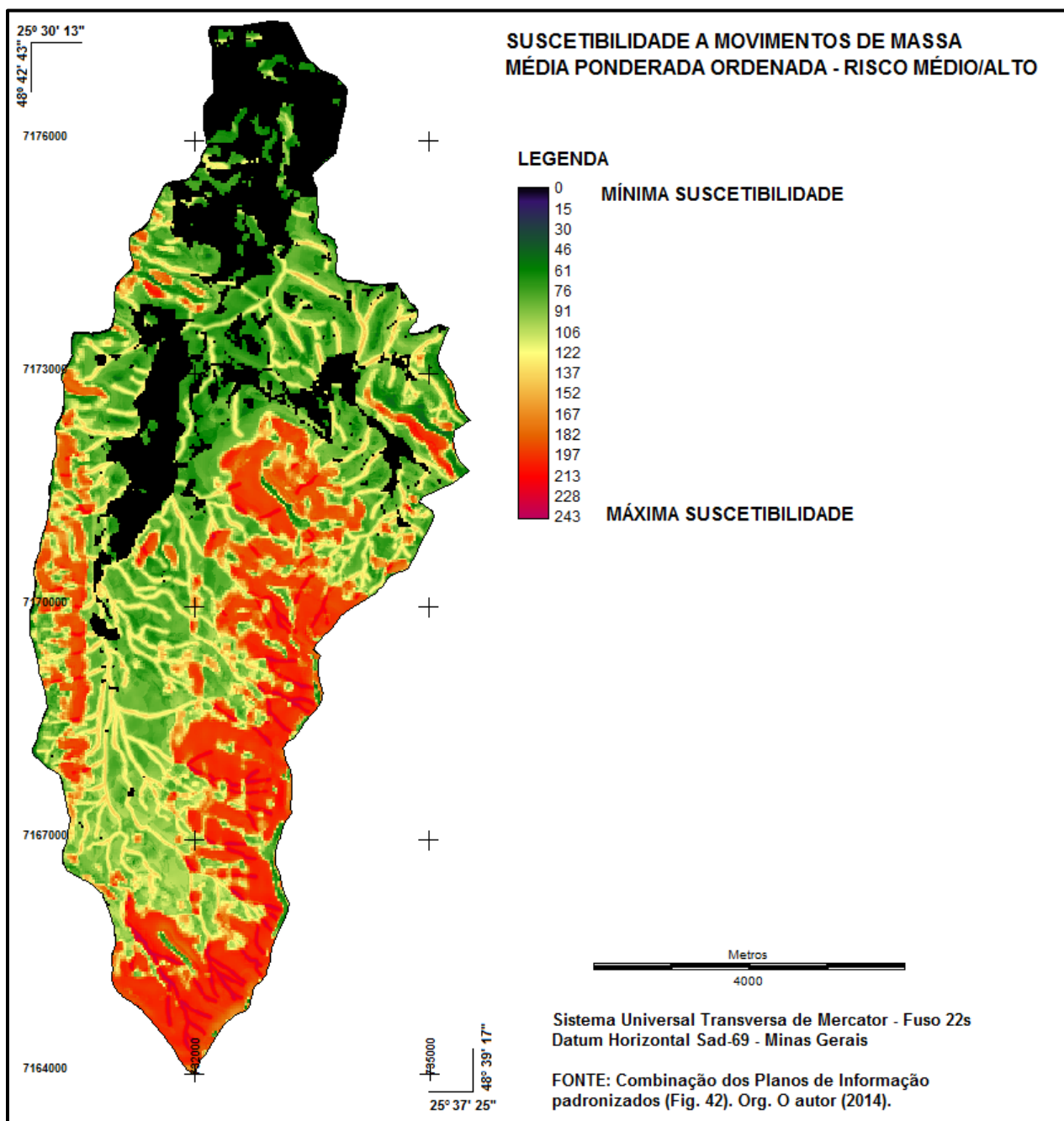


FIGURA 49 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí pela Média Ponderada Ordenada – OWA, com risco médio/alto e compensação parcial entre os fatores (Cenário 5). FONTE: Agregação e combinação dos Planos de Informação padronizados (fatores), Figura 42. Org.: O autor (2014).

Assim como no mapa resultante da Combinação Linear Ponderada foi utilizado o mesmo processo de reclassificação e a imagem original foi dividida em cinco categorias: Sem Suscetibilidade, área correspondente a restrição (declividade inferior a

6%); Baixa Suscetibilidade com intervalo de 1 a 63; Moderada Suscetibilidade, entre 63 a 127; Alta Suscetibilidade, entre 127 a 191 e Muito Alta Suscetibilidade, com intervalo entre 191 a 255, resultando no mapa síntese com diferentes categorias de suscetibilidade (FIGURA 50).

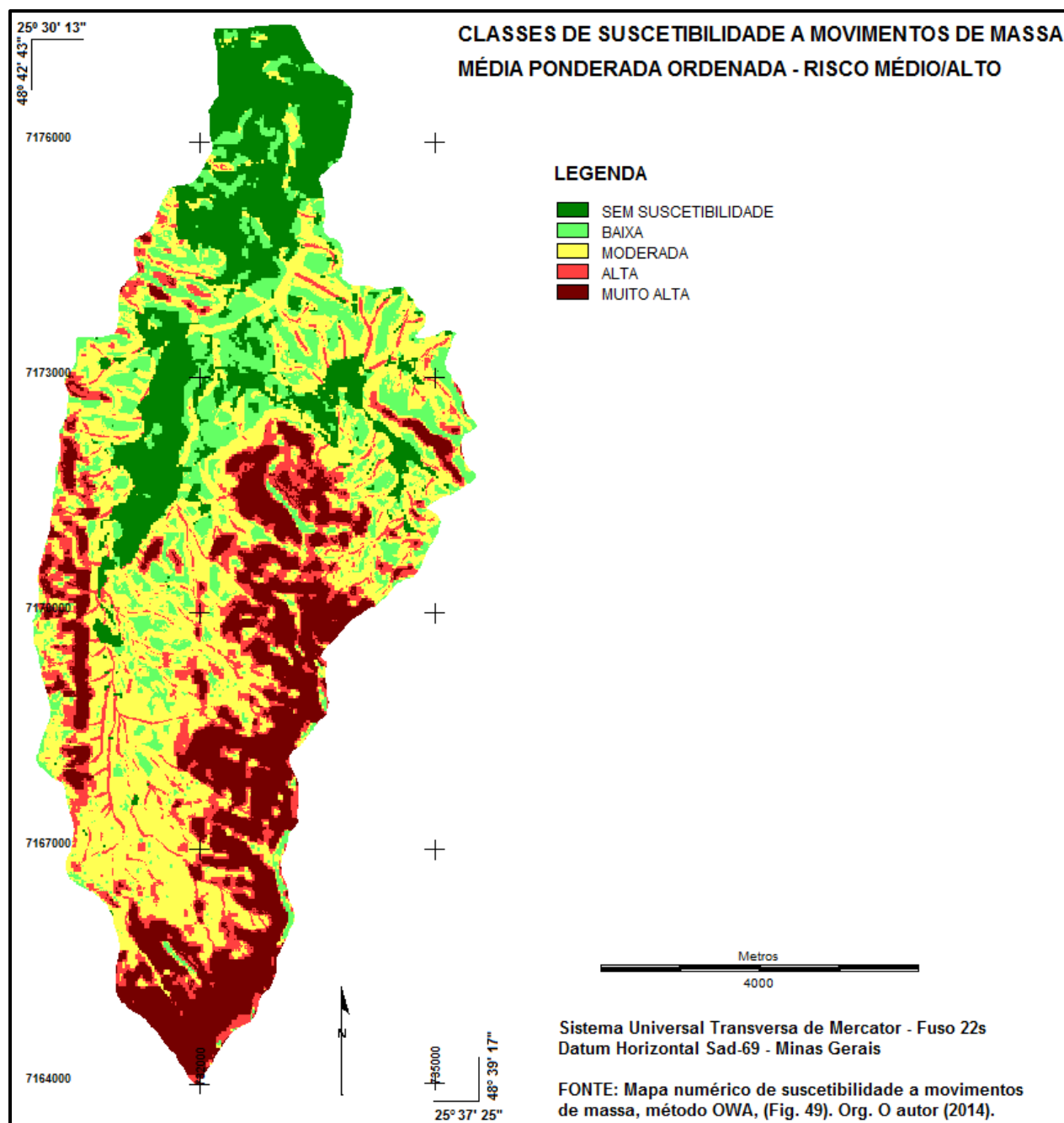


FIGURA 50 - Mapa com diferentes classes de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí pelo método da Média Ponderada Ordenada - OWA, com risco médio/alto. FONTE: Mapa numérico de suscetibilidade aos movimentos de massa - OWA Figura 49. Org.: O autor (2014).

O mapa de classes de suscetibilidade, Cenário 5 da Média Ponderada Ordenada, assim como o modelo produzido pela Combinação Linear Ponderada, indicou predomínio da classe Moderada Suscetibilidade, porém com acréscimo de área considerável da classe Muito Alta Suscetibilidade, 15,52% (TABELA 11).

TABELA 11 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE DA ÁREA DE ESTUDO. CENÁRIO 5 MÉDIA PONDERADA ORDENADA.

Classes de Suscetibilidade	Área (ha)	%
Sem Suscetibilidade	733,74	17,78
Baixa	600,58	14,57
Moderada	1424,19	34,48
Alta	558,07	13,52
Muito Alta	811,32	19,65
Total	4127,91	100

FONTE: O autor (2014).

Na comparação das classes obtidas pelo Cenário 5 sobrepostas às cicatrizes do mapa de inventário, verificou-se que 82,56% das zonas de origem dos processos coincidiram com as classes Alta (17,74%) e Muito Alta Suscetibilidade (64,82%) demonstrando considerável consistência do método aplicado, dos parâmetros utilizados e dos resultados obtidos (FIGURA 51).

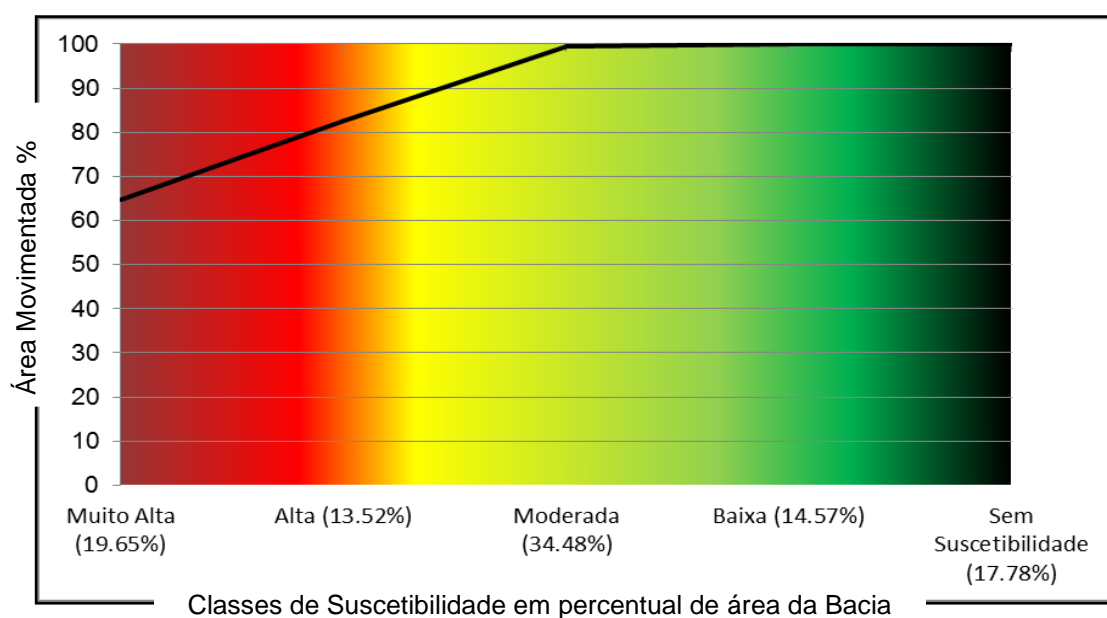


FIGURA 51 - Gráfico cumulativo com análise de desempenho do cenário de suscetibilidade sobreposto às áreas movimentadas. 64,82% dos pixels indicando áreas movimentadas coincidiram com a classe Muito Alta, 17,74% com a classe Alta, 16,95% Moderada e 0,49% com a Baixa. FONTE: O autor (2014).

Com a sobreposição do mapa de suscetibilidade Cenário 5 e o mapa de inventário é possível observar, com certa facilidade, a coincidência entre as classes referidas e as cicatrizes dos processos, zonas de origem dos movimentos de massa na forma de escorregamentos, corridas, quedas e rolamentos de rochas (FIGURA 52).

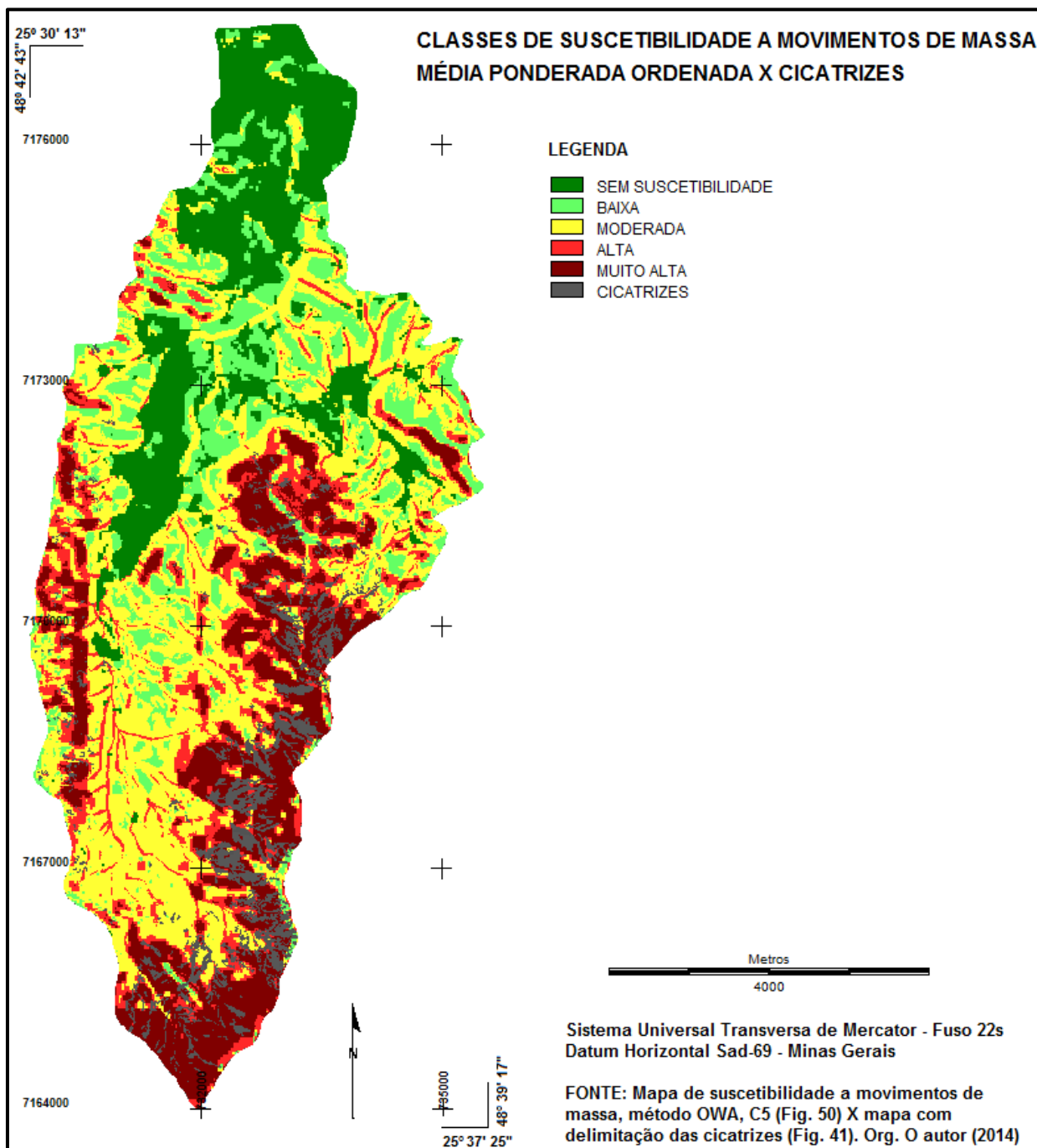


FIGURA 52 - Classes de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí pela Média Ponderada Ordenada (Cenário 5) com mapa de inventário das cicatrizes sobreposto. FONTE: Mapa de suscetibilidade aos movimentos de massa OWA, Figura 50 X mapa com delimitação das cicatrizes, Figura 41. Org.: O autor (2014).

Áreas classificadas como de elevada suscetibilidade (Classes Alta e Muito Alta) onde não ocorreram sobreposições e, portanto que não sofreram escorregamentos estão no mesmo contexto físico-natural daquelas em que grandes volumes de materiais vieram encosta abaixo e se enquadram na mesma condição de instabilidade, dessa forma são passíveis de movimentação futura, em recorrência de eventos pluviométricos similares (FIGURA 53).

É relevante realçar que no evento ora analisado foram registrados índices pluviométricos da ordem de 400mm entre os dias 10 e 12 de março 2011 em pluviômetros instalados nas proximidades da BR-277 e 250mm apenas no dia 11 de março de 2011, muito acima da normalidade. (SIMEPAR, 2011).



FIGURA 53 - Foto obtida imediatamente após o evento demonstrando a existência de remanescentes de áreas florestadas apontadas com setas em vermelho onde não houve escorregamento ou desprendimento de blocos, inseridas no mesmo contexto de suscetibilidade das áreas adjacentes, marcadas pelas cicatrizes, cujo material transportado, registrado em primeiro plano na foto, foi depositado em forma de cone de dejeção, recobrimdo a planície de inundação do Rio Jacareí, assoreando o canal fluvial. FONTE: MINEROPAR (2011).

Algumas reflexões acerca dos fenômenos estudados e da coerência dos resultados são relevantes. Deve-se levar em conta que numa mesma unidade de área afetada por movimentos de massa ocorrem normalmente três fases ou zonas distintas, porém consequências do mesmo processo: a zona de desprendimento de material (solo, rocha, matéria orgânica ou material composto) onde o fenômeno tem origem; a zona de escoamento ou passagem, por onde o material é transportado e por fim, a zona de deposição, que sem dúvida, tem suas ocorrências também associadas à instabilidade das vertentes.

Ao confrontar os cenários produzidos com o mapa de inventário constatou-se que o maior índice de acerto foi obtido no Cenário 5 (OWA – risco médio/alto e compensação parcial). Quando este é comparado com o produzido pelo método da WLC, a Classe Muito Alta Suscetibilidade, teve índice superior em 45,69% de coincidência (64,82% da OWA e 19,13% da WLC), embora considerando que no Cenário 5 a área com esta classe tenha sido maior em 15,52% (OWA 19,65% e WLC 4,13%) os melhores resultados da OWA foram obtidos em função do maior controle permitido pelo método.

5.4 AVALIAÇÃO DE CAMPO

De posse do Cenário 5 (FIGURA 50), o qual apresentou índices maiores de precisão, a etapa final consistiu no levantamento de campo, com pontos definidos de acordo com as diferentes categorias de suscetibilidade, para serem checados *in loco*, com intuito de demonstrar compatibilidade entre o que foi definido no modelo e a condição real da paisagem. Neste sentido, foram selecionados para a verificação 10 pontos, identificados com suas respectivas coordenadas UTM (*Universal Transverso de Mercator*), que foram verificados com uso de GPS no campo (QUADRO 7).

Pontos	Coordenadas UTM	
	X	Y
1	731682.3	7172559.0
2	731560.5	7171976.2
3	730984.1	7171042.8
4	730941.5	7170303.3
5	731005.9	7170188.5
6	731171.2	7170204.9
7	731210.3	7170236.4
8	731244.4	7170635.2
9	731665.8	7170752.6
10	733073.4	7169864.2

QUADRO 7 – PONTOS DE CONTROLE DE CAMPO COM SUAS RESPECTIVAS COORDENADAS UTM.

Org.: O autor (2014).

Os registros fotográficos foram georreferenciados (FIGURA 54), com intuito de apresentar um mosaico de imagens demonstrando a expressão da modelagem na realidade e acrescentando confiabilidade aos resultados obtidos.

Os pontos 1 e 2 localizam-se nas proximidades da BR 277, no início da estrada rural que dá acesso ao Distrito de Floresta. Estes pontos demonstram áreas que foram retiradas da análise, quando adotado o critério restritivo declividades inferiores a 6%, por serem locais de deposição de sedimentos, em pacotes espessos, com inclusão de materiais que já sofreram pedogênese, o que permite uma evolução na formação de novos solos com os referidos materiais, de forma diferenciada a registrada nas áreas fontes, onde a morfogênese predomina.

As áreas de deposição referidas foram classificadas como Sem Suscetibilidade aos movimentos de massa na forma de escorregamentos, quedas e rolamentos de blocos, porém com predomínio da morfogênese deposicional em detrimento da pedogênese, classificadas pelo critério de Tricart (1977) como áreas instáveis.

São as áreas onde ocorre a ocupação e desenvolvimento da atividade agrícola, algumas residências dividem espaço com a agricultura de subsistência sobre a deposição recente de materiais pela ação fluvial e pluvial em forma de leque de sedimentação, que contribuiu para a fertilização dos solos. Parte desse material foi retrabalhado com a corrida de lama de março de 2011. Trata-se de locais sem risco de desprendimento e movimentação de material, mas de alta propensão a eventos associados, como as inundações, assoreamento dos canais fluviais e deposição de

detrritos, troncos de árvores e blocos misturados com material arcoseano (FIGURAS 55 e 56).

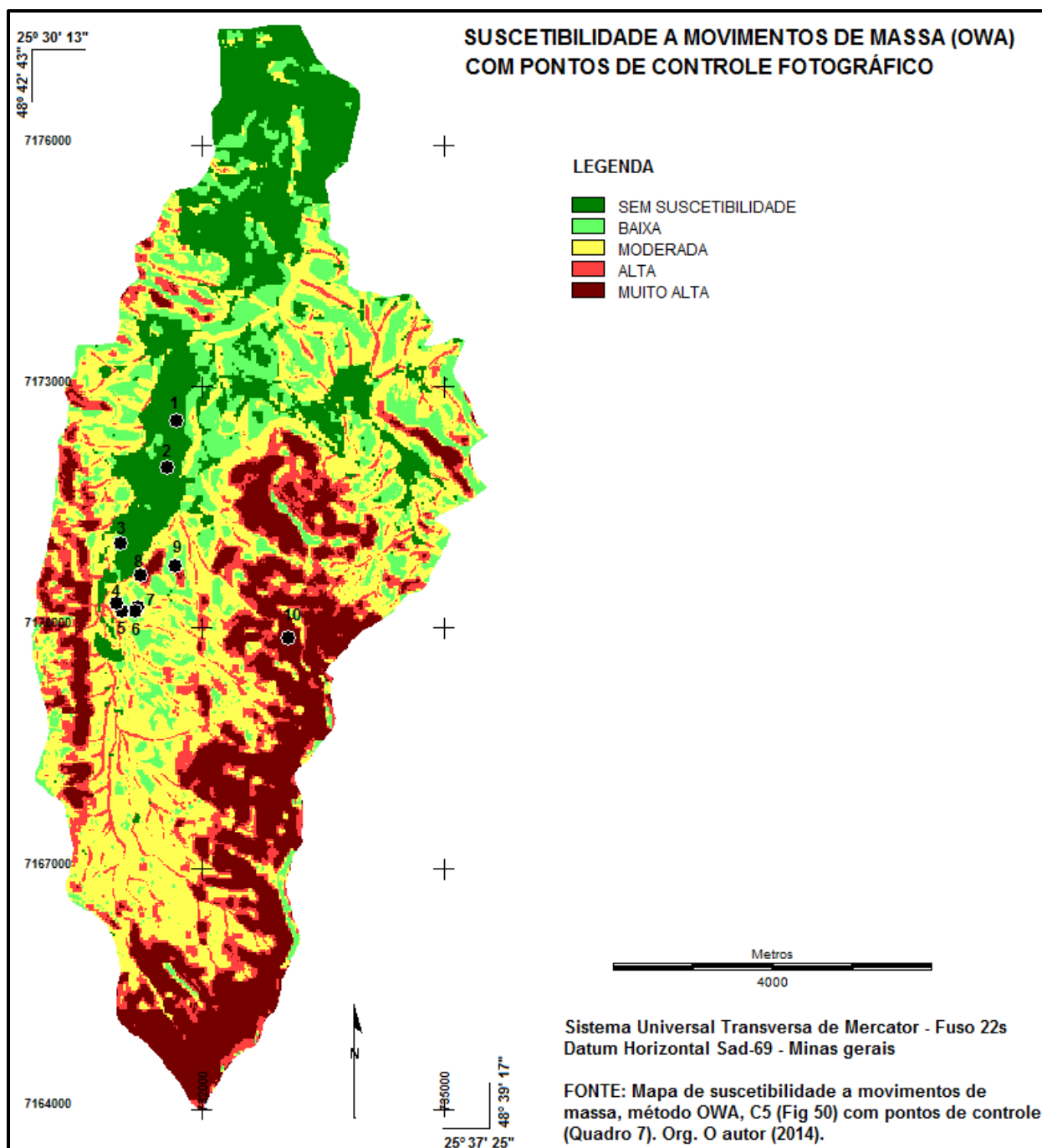


FIGURA 54 - Mapa com pontos de visita em campo para tomadas fotográficas, indicando diferentes classes de suscetibilidade. FONTE: Mapa de suscetibilidade aos Movimentos de Massa OWA (Cenário5), Figura 50 e pontos de controle do Quadro7. Org.: O Autor (2014).



FIGURA 55 - Ponto 1, foto ilustrando área classificada como Sem Suscetibilidade ao desencadeamento de movimentos de massa em questão (declividade inferior a 6%). Observa-se a grande quantidade de troncos depositados, resultante dos eventos de março de 2011, configurando-se, portanto, como área diretamente afetada pela deposição dos materiais movimentados das encostas. FONTE: O autor (2011).



FIGURA 56 - Ponto 2, a foto ilustra área livre de ocorrência dos movimentos de massa na forma de desprendimentos. Planície de inundação, área de deposição, com cultivo de hortaliças, também classificada como Sem Suscetibilidade. FONTE: O autor (2013).

Os pontos 3 e 4 referem-se aos locais classificados como de Baixa Suscetibilidade. Estão praticamente no mesmo contexto geoambiental de áreas que foram consideradas restritivas para a análise devido à baixa declividade e são locais em que predomina a deposição de sedimentos diversos. De modo geral, possuem perfil retilíneo, estão entre as declividades de 6 a 12%, com baixas altitudes, entre 20 e 40 metros, aproximadamente, com predomínio de aluviões recentes e ocorrência de associação de Latossolos e Argissolos, com floresta em estágio inicial de desenvolvimento ou agricultura temporária e ocupação residencial (FIGURAS 57 e 58).



FIGURA 57 - Ponto 3, foto ilustrando área com Baixa Suscetibilidade. Observa-se a ocupação residencial, declividade em torno de 10%, com vegetação rasteira à frente e em estágio inicial ao fundo. FONTE: O autor (2013).



FIGURA 58 - Ponto 4, Baixa Suscetibilidade. Estrada rural, com 6 a 12% de declividade, solo espesso e vegetação em estágio intermediário. FONTE: O autor (2013).

Os pontos de controle 5 e 6, classificados como de Moderada Suscetibilidade encontram-se em uma região com característica mista quanto ao uso, apresentando áreas de ocupação rural, cercado por mata em estágio inicial de desenvolvimento e com distância de aproximadamente 80m do Rio Tingidor, afluente do Jacareí. Quanto ao relevo, apresenta-se com declividade entre 12 a 20%, com perfil retilíneo e altitude de cerca de 80 m adentrando a Serra da Prata. Com relação à litologia é composta por “Migmatitos estromáticos com paleosoma de biotita-hornblenda gnaiss, mica-quartzo xisto, ultrabásito, metabásito e anfibólito. O solo é do tipo associação de Argissolos e Cambissolos”. (MINEROPAR, 2011).

Nesta área, indicada pelo modelo como de Moderada Suscetibilidade, foram encontrados blocos rochosos transportados ou rolados, com elevado grau de intemperismo, evidenciando a ocorrência de descarga destes materiais em eventos pretéritos, com movimentação, transporte e deposição neste ponto, demonstrando risco aos moradores locais. Notou-se, entretanto, que estes blocos estão estabilizados e apresentam pequena possibilidade de nova movimentação (FIGURAS 59 e 60).



FIGURA 59 - Ponto 5, Moderada Suscetibilidade. Área de ocupação rural, com declividades entre 12 e 20%. Pequena propriedade agrícola ocupada com pastagem. FONTE: O autor (2013).



FIGURA 60 - Ponto 6, às margens do vale do Rio Tingidor, afluente do Rio Jacareí. Área classificada como de Moderada Suscetibilidade. Os blocos rochosos de litologia diversificada, com certo grau de intemperismo, em patamares ou ombreiras onde a natureza dos materiais demonstram que a área sofreu deposição no passado, em ações de eventos similares, ocorridos no mesmo vale. FONTE: O autor (2013).

Os pontos 7 e 8 classificados como de Alta Suscetibilidade, apresentam características geoambientais inerentes a essa condição, conforme definição de parâmetros e pesos de importância para os atributos propostos. Em linhas gerais, esses pontos localizam-se em áreas com declividade entre 30 e 45%, perfis côncavos, altitude acima dos 200m e pequenas distâncias dos rios afluentes do Jacareí, inferior a 20m. Quanto aos solos, compõem-se principalmente de Neossolos Litólicos e a litologia é a mesma identificada no ponto anterior (FIGURAS 61 e 62)



FIGURA 61 - Ponto 7, classificada como de Alta Suscetibilidade, a área é caracterizada por declividades acima de 35%, proximidade do canal fluvial inferior a 20m e com outras características como às observáveis no solo e materiais deposicionais expostos sobre rocha sã, a qual constitui uma superfície de baixíssima permeabilidade em plano de ângulo favorável ao escorregamento. FONTE: O autor (2013).



FIGURA 62 - Ponto 8, Alta Suscetibilidade. Ao fundo, morros isolados com pastagem (lado direito da foto) e vegetação em estágio avançado de desenvolvimento (lado esquerdo). Em primeiro plano, materiais depositados em cone de dejeção, produzido no evento de março de 2011, em processo de retrabalhamento pela ação fluvial. FONTE: O autor (2013).

Os pontos de controle 9 e 10 indicam áreas que se classificaram como de Muito Alta Suscetibilidade. Primeiramente, o ponto 9 encontra-se em área com floresta em estágio avançado de desenvolvimento, apresenta altitude entre 200 e 300 m, declividade acima de 40% e perfil predominantemente côncavo. Quanto ao solo, predomina a associação Cambissolos e Argissolos e a litologia é composta por migmatitos estromáticos com paleosoma de biotita-hornblenda gnaiss, mica-quartzo xisto, ultrabásito, metabásito e anfibólito (FIGURA 63).



FIGURA 63 - Ponto 9: Muito Alta Suscetibilidade. Área isolada, recoberta por vegetação em estágio avançado de desenvolvimento, porém caracterizada por declividade elevada, acima de 40% e perfil côncavo, com cicatrizes visíveis de escorregamentos do episódio de março de 2011. FONTE: O autor (2013).

O ponto 10 indica um local identificado como de Muito Alta Suscetibilidade pela modelagem, a área é recoberta pela Floresta Atlântica em estágio avançado de desenvolvimento, com distância inferior a 50m de um afluente do Rio Jacareí, declividade de aproximadamente 50% e altitude acima dos 600m. Apresenta ainda solo composto por associação de Cambissolos e Argissolos. Quanto à litologia, predominam as rochas graníticas. Neste ponto e arredores foram verificadas cicatrizes dos eventos de 2011, entretanto, devido ao difícil acesso, não houve possibilidade de tomadas fotográficas de detalhe, as imagens foram registradas dentro das possibilidades de alcance para constatação do evidenciado no mapa síntese (FIGURA 64).



FIGURA 64 - Ponto 10, Muito Alta Suscetibilidade. Ao fundo, no alto da encosta, observam-se cicatrizes dos movimentos e a área contígua, que está no mesmo contexto de suscetibilidade. Fotografia tomada a partir do talvegue do Rio Tingidor, afluente do Rio Jacareí, com visão para montante. Observam-se também, os matacões de tamanhos diversos entre outros detritos, depositados no fundo do vale, resultado dos movimentos de março de 2011 e/ou remobilizados, onde grande parte dos maiores deve ter sido transportada em eventos anteriores. FONTE: O autor (2013).

6 CONCLUSÕES

Em conformidade com os resultados obtidos, constatou-se que a Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí, apresenta elevado grau de instabilidade das vertentes, com suscetibilidade elevada à ocorrência dos movimentos de massa em grande parte de sua extensão, 33,17% da área, aproximadamente 1/3 da bacia, considerando o Cenário 5, gerado pela Média Ponderada Ordenada, que obteve maior precisão, consequência das condições geoambientais que integram essa unidade de área, especialmente a elevada declividade, com relevo montanhoso e as formas côncavas das vertentes, além de amplitudes altimétricas relativamente altas.

Tais condições associadas aos elevados índices pluviométricos (fator desencadeante), típicos da região, confirma esta tendência e coloca a população local sob permanente alerta.

Avalia-se, dentro dos preceitos da abordagem ecodinâmica de Tricart (1977), que o conjunto da bacia hidrográfica estudada, evidencia uma natureza de instabilidade morfodinâmica, sendo na pesquisa, delimitadas áreas caracterizadas pela suscetibilidade a movimentação na origem dos materiais deslocados, em particular nos movimentos de massa, no fundo do vale e planície, por dar passagem ou receber o material desprendido e ou erodido das encostas e interflúvios.

Os eventos ocorridos em março de 2011 caracterizaram-se por sua grande magnitude e sua composição complexa. Houve uma convergência de processos combinando: escorregamentos rotacionais e translacionais, com desprendimentos, deslocamento de blocos e mobilização de detritos e solos, incluindo a cobertura vegetal arbórea, que provocou represamento momentâneo do fluxo fluvial no fundo do vale e com o aporte considerável de água, em momento de elevada precipitação, quando o material inconsolidado argiloso transformou-se em lama, provocando o inevitável rompimento destes represamentos, originando uma avalanche de lama e detritos, incorporando blocos rochosos e materiais deslocados ou desprendidos do vale e leito fluvial pelo próprio movimento dessa massa viscosa de alta densidade, à jusante. Esta combinação de fenômenos classificados como movimentos rápidos complexos, são

relativamente frequentes em regiões de serra, sendo conhecidos pela população local como "cabeça d'água".

Os depósitos sedimentares de tálus e colúvios, identificados nos canais de drenagem, originários das porções mais elevadas da Serra da Prata e a distribuição de matacões e terraços com depósitos rudáceos evidenciam que os movimentos de massa são diversificados e que fenômenos semelhantes são recorrentes na bacia. Chuvas intensas e concentradas, antecedidas de episódios pluviométricos amenos, porém constantes, como o de março de 2011, são responsáveis diretos pela deflagração dos movimentos de massa e inundações, e mesmo sendo demonstrada a instabilidade das vertentes em análise, provavelmente processos com a magnitude registrada, não aconteceriam em condições de solo seco e, portanto, estes foram desencadeados pela saturação do solo.

Embora o estudo tenha proposto o mapeamento das áreas propensas aos movimentos na forma de escorregamentos, desprendimentos, quedas e rolamento de blocos, as inspeções de campo revelaram a presença de sedimentos inconsolidados por toda a planície de inundação do Rio Jacareí, com deposição de material diverso, presença de silte, argila, areia e matacões de grandes dimensões. Como a ocupação e práticas agrícolas concentram-se principalmente na planície, embora haja benefícios da composição do solo resultante de processos pretéritos, a preocupação incide sobre possíveis mobilizações e deslocamentos futuros.

Observou-se ainda, que depósitos de tálus e colúvios parcialmente removidos, incorporados aos fluxos de detritos, ficaram expostos em taludes ao fundo do vale aprofundado pela passagem da massa movimentada no evento em questão, apresentando relativa instabilidade e sendo passíveis de serem deslocados, além de material (solo, rocha ou composto) localizado próximo às cicatrizes, no terço superior das vertentes e que não vieram encosta abaixo, mas que poderão se desprender em decorrência de novos eventos pluviométricos, mesmo com menor magnitude, ou pela simples ação gravitacional, em cortes verticalizados produzidos também pela passagem da massa.

Quanto aos modelos produzidos e apresentados, confirmaram-se os pressupostos iniciais de que a atuação dos condicionantes de instabilidade das

vertentes determina a distribuição dos movimentos de massa nas encostas e que a agregação destes condicionantes, por meio da Avaliação Multicritério em suas derivações, Combinação Linear Ponderada (WLC) e Média Ponderada Ordenada (OWA) possibilita a elaboração de modelos preditivos de suscetibilidade com razoável eficiência, porém cada qual com particularidades específicas, sendo que:

- 1- O método da WLC apresentou resultados com significativa eficácia, quando submetido à comparação com o mapa de inventário das ocorrências cartografadas, aproximadamente 80% das cicatrizes dos processos coincidiu com as categorias Alta e Muito Alta Suscetibilidade, 61,01% e 19,12% respectivamente.
- 2- O método da OWA, cenário 5, apresentou resultados ainda mais interessantes, quando adotado risco médio/alto e compensação parcial, houve coincidência de 82,55% para as classes de suscetibilidade descritas, sendo que se considerada apenas a classe Muito Alta o índice foi de 64,81%.

Nesta pesquisa, ensaios com o método *Booleano*, que seria uma terceira possibilidade, também foram efetuados. Porém, o modelo foi descartado, uma vez que tal procedimento exige que os condicionantes sejam transformados em imagens rígidas *Booleanas* e multiplicados para produção de uma imagem única, tendo como característica principal a não compensação entre os fatores e o risco mínimo na tomada de decisão. O modelo resultante da operação *Booleana* apresentou-se totalmente inconsistente, sem nenhum pixel demonstrando suscetibilidade elevada. Não se trata de qualificar um método em detrimento de outros, mas este se mostrou ineficiente para este tipo de análise em particular.

O produto final resultante da OWA, que obteve maior consistência, está relacionado à característica deste método de possibilitar ao tomador de decisão, alternativas em Avaliação Multicritério envolvendo análises complexas como a ambiental, permitindo a atribuição de parâmetros às variáveis envolvidas de acordo com sua influência nos processos avaliados. O pesquisador pode assumir maior ou menor risco e decidir sobre a compensação das variáveis, conforme as peculiaridades de cada estudo. Os pesos de ordenação facilitam a correção de possíveis riscos na tomada de decisão, o que permite aprimorar o resultado final, se comparado ao método WLC.

Ressalta-se que outros ensaios variando os pesos de ordenação com a OWA também foram realizados e dispensados diante da incongruência dos resultados com a realidade. Nessa perspectiva, é oportuno destacar que para a utilização dos procedimentos é indispensável o conhecimento aprofundado do ambiente em análise, para que se tenha coerência na definição de pesos de compensação e de ordenação entre as variáveis envolvidas nas decisões, confirmando o conceito: orientado pelo conhecimento (*knowledge-driven*) dos métodos aplicados.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As condições geoambientais identificadas na área de estudo indicam a possibilidade de ocorrência de eventos futuros, com intensidade semelhante ao episódio analisado, colocando a população residente nessa região em risco iminente, demonstrando que o poder público deve tomar iniciativas no sentido de mitigar os efeitos devastadores registrados, realocando as residências e mesmo impedindo a construção destas em áreas de risco.

A produção de modelos de suscetibilidade a movimentos de massa como ora apresentado é uma etapa indispensável para a gestão de riscos aos desastres naturais, portanto é relevante que novas metodologias sejam testadas com objetivo de aprofundar o conhecimento referente à temática, visando o aperfeiçoamento das técnicas e, como consequência, a diminuição dos impactos negativos que estes fenômenos, eventualmente, provocam à sociedade.

Os condicionantes de instabilidade das vertentes, combinados, que determinaram áreas suscetíveis a movimentos de massa, adotados a partir de levantamento bibliográfico, com estudos específicos, que faz abordagem da fragilidade ambiental de forma geral, estão relacionados às particularidades locais. Desse modo, a sua valoração é relativa e pode ser aperfeiçoada e adequada a cada caso.

Com a litologia enquanto condicionante, por exemplo: pode-se admitir que embora as rochas sedimentares sejam destacadas pela literatura, como mais suscetíveis à erosão e movimentação, no Brasil há concentração de registros de eventos catastróficos em relevo sob predomínio de rochas magmáticas e metamórficas, e nesse contexto, análises quantitativas levam a classificá-las como mais instáveis.

A conformidade apresentada na padronização dos condicionantes, entre os pesos de compensação, de ordenação e o resultado final conferiram efetividade à modelagem, confirmada após a confrontação das ocorrências registradas no mapa de inventário, com cicatrizes dos eventos de março de 2011 e da avaliação de pontos de controle em campo, com as categorias de suscetibilidade estabelecidas no mapa síntese.

A proposta combinou métodos estatísticos com avaliações empíricas, uma vez que se valeu da existência de relações entre os fatores condicionantes de instabilização

e a distribuição dos escorregamentos. Entretanto, não se utilizou de inventário para estabelecer associações entre eventos antigos e parâmetros de suscetibilidade, conforme determinadas características geoambientais. Os parâmetros e pesos de importância relativa foram adotados de acordo com uso testado de especialistas. O referido inventário foi empregado no momento da verificação e validação dos resultados. O propósito foi de apresentar uma metodologia a ser aplicada em outros estudos de caso, sem a dependência de inventários.

Portanto, os resultados alcançados com este procedimento permite sugerir a aplicação do método em outras áreas que não disponham de inventários, eventualmente por falta de dados cartográficos digitais atualizados e confiáveis (imagens de satélites, fotografias aéreas, etc.) para a realização destes, ou mesmo pela impossibilidade de aquisição de informações, devido a dificuldades de levantamentos de campo, como acesso a áreas montanhosas, semelhantes ao da área estudada.

Recomenda-se ainda, quanto à produção de inventários, que estes sejam precedidos de análise "*in loco*" para definição dos parâmetros de instabilidade, com base no detalhamento de estudo da tipologia diversificada dos processos envolvidos na movimentação dos materiais em relação às cicatrizes registradas, onde em geral, não há identificação específica do tipo dos movimentos que as originaram.

Finalmente, considera-se que os procedimentos adotados nesta tese poderão ser devidamente apropriados, reutilizados e reavaliados em estudos futuros e quanto à sua aplicação restrita, esta pode ser creditada a limitada divulgação e existência destas ferramentas analíticas em *softwares* de Sistema de Informações Geográficas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, C, M. O. Diálogo entre as dimensões real e virtual do urbano In: ALMEIDA, C, M; CÂMARA G; MONTEIRO A. M. V. (Orgs.) **Geoinformação em urbanismo: cidade real X cidade virtual**. São Paulo: ed. Oficina de Textos, 2007 p.19-31.
- ANGULO, R. **Geologia da planície costeira do Estado do Paraná**. 334 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- ANGULO, R. **Mapa do Cenozoico do Litoral do Estado do Paraná**. Boletim Paranaense de Geociências, n. 55, p. 25-42, Editora UFPR. 2004.
- ARAÚJO, P. C. de. **Análise da suscetibilidade a escorregamentos: uma abordagem probabilística**. 172 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro – SP, 2004.
- AUGUSTO FILHO, O. VIRGILI, J. C. Estabilidade de Taludes. In: OLIVEIRA, A. M. D. S. e BRITO, S. N. A. D. (Ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 2004. p. 243-269.
- AYALEW, L.; YAMAGISHI, H. **The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan**. Original Research Article Geomorphology, Volume 65, Issues 1–2, 1 February 2005, Pages 15-31. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X04001631>. Acesso em: 04 de julho de 2012.
- BANDEIRA, A. P. N.; COUTINHO, R. Q.; ALHEIROS, M. M. **Landslide hazard map in an area of Camarigibe city, Pernambuco, Brazil**. In: LACERDA, EHRlich, FONTOURA & SAYÃO (Eds) **Landslides: Evaluation and Stabilization**. Taylor & Francis Group, London, 2004., p. 303-309.
- BARNETCHE, D.; MORETTI, S. D. Mapeamento de risco de deslizamentos e enchentes da bacia do rio Vadik: aspectos físicos e de ocupação urbana. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS. 1., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. p. 102-116.
- BARREDO, J. I.; BENAVIDES, A.; HERVÁS, J.; WESTEN, C. J. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. **JAG: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 2, n. 1, p. 9-23, 2000.
- BHERING, S. B.; SANTOS, H. G. (Ed.). **Mapa de solos do Estado do Paraná: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: EMBRAPA/IAPAR, 2008. 74p.

BIASE, M. A. carta clinográfica: os métodos de representação e sua confecção. In: **Revista do Departamento de Geografia**. v. 6. São Paulo FFLCH-USP, 1995.

BIGARELLA, J. J.; AB'SABER A. N. "**Paläogeographische und paläoklimatische Aspekte des Känozoikums in Südbrasilien.**" Zeitschr. Geomorph., Berlin 8.3 (1964): 286-312.

BIGARELLA, J. J.; MOUSINHO M. R. **Movimentos de massa no transporte dos detritos da meteorização das rochas.** Boletim Paranaense de Geografia, UFPR. Curitiba, n. 16/17. 1965. p. 43-84.

BIGARELLA, J. J.; MOUSINHO M. R.; SILVA, J. X. **Considerações a respeito da evolução das vertentes.** Boletim Paranaense de Geografia, UFPR. Curitiba, n. 16/17. 1965. p. 85-116.

BIGARELLA, J. J.; MOUSINHO M. R.; SILVA, J. X. **Pediplanos pedimentos e seus depósitos correlativos no Brasil.** Boletim Paranaense de Geografia, UFPR. Curitiba, n. 16/17. 1965a. p. 117-151.

BIGARELLA, J. J. **Serra do Mar e a porção oriental do estado do Paraná** - contribuição a geografia, geologia e ecologia regional. Curitiba: SEPLAN, 1978.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; PASSOS, E. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais.** Florianópolis: Ed. Da UFSC, 1996 v. 2. 875 p.

BIGARELLA, J. J.; PASSOS, E.; HERRMANN, M. L. P.; SANTOS, G. F.; MENDONÇA, M.; SALAMUNI, E.; SUGUIO, K. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais.** Florianópolis: Ed. Da UFSC, 2003 v. 3 (p. 877-1436).

BISPO, P. da C. ALMEIDA, C. M.; VALERIANO M. M.; MEDEIROS J. S.; CREPANI, E. **Análise da suscetibilidade aos movimentos de massa em São Sebastião (SP) com o uso de métodos de inferência espacial.** São Paulo, UNESP, Geociências, v. 30, n. 3, p. 467-478, 2011.

BLASCHKE, T.; LANG, S. **Análise da Paisagem com SIG.** Tradução Hermann Kux. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 424p.

BLUM, C.T. **A Floresta Ombrófila Densa na Serra da Prata, Parque Nacional Saint-Hilaire/Lange, PR – Caracterização Florística, Fitossociológica e Ambiental de um Gradiente Altitudinal.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, UFPR, Curitiba-PR. 2006.

BOTELHO, R. G. M. Planejamento Ambiental em Microbacia Hidrográfica. In GUERRA, A. J. T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R. G. M. (Orgs.). **Erosão e conservação dos solos – conceitos, temas e aplicações.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

BOTELHO, R. G. M.; SILVA, A. S. Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental. In: VITTE, A. C. e GUERRA, A. J. T.. **Reflexões sobre a geografia física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 280p.

BURROUGH, P. A. **Development of intelligent geographical information system**. In: International Journal of Geographical Information Systems. (1): 1 – 11, 1992.

CALIJURI M. L.; LOURES S. S. P. **Análise Estratégica de Decisão**. Viçosa, MG: Laboratório de Pesquisa em Sistemas de Informação Geográfica, 2006. 57p.

CÂMARA, G.; MOREIRA R. F.; BARBOSA C. C.; FILHO R. A.; BÔNISCH S. **Inferência Geográfica e Suporte à Decisão**. São José dos Campos, SP: INPE, 2001. Disponível em: <[http:// www.dpi.inpe.br](http://www.dpi.inpe.br)>. Acesso em 10 de fevereiro de 2012.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução a Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos, SP: INPE, 2001. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br>>. Acesso em 26 de janeiro de 2012.

CANEPARO, S. C. Análise da dinâmica espacial da ocupação antrópica em Paranaguá/PR (1952-1996), através do uso de Sistemas de Informações Geográficas In: **RA'E GA O espaço geográfico em Análise**. Editora UFPR. 2000. p. 111-130.

CARDOZO, F. S.; HERRMANN, M. L. P. Uso da técnica AHP no mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p. 0949. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.27.18.51/doc/p0656.pdf>. Acesso em: 23 de maio de 2012.

CARRARA, A.; CARDINALI, M.; GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P. GIS technology in mapping landslide hazard. In: Carrara, A.; Guzzetti, F. (Ed.) **Geographical information systems in assessing natural hazards**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. Cap. 8, p. 135-175.

CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A.T. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 2007. 176p.

CAVIGLIONE, J.H.; KIIHL, L.R.M.; CARAMORI, P.H. **Cartas climáticas do Paraná** - edição 2000, versão 1.0. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná, 2000.

CASSETI, V. **Ambiente e apropriação do relevo** – São Paulo: Contexto, 1991. 147p.

CASSETI, V. **Elementos de Geomorfologia**, Goiânia: Ed. da UFG, 1994. 137p.

CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S.l.]: [2005]. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em: 03 de maio de 2012.

CEREDA JUNIOR, A. **Análise de Fragilidade Ambiental com Métodos Multicritério Críticas e Proposta Metodológica**. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana). Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. (2011).

CERRI, L. E. D. S.; AMARAL, C. P. D. Riscos Geológicos. In: OLIVEIRA, A. M. D. S. e BRITO, S. N. A. D. (Ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

CHAUHAN, S.; SHARMA, M.; ARORA, M. K.; GUPTA, N.K. **Landslide susceptibility zonation through ratings derived from artificial neural network**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 12, p. 340-350, 2010.

CHRISTOFOLETTI, A. "A Análise de bacias hidrográficas." **Geomorfologia**, Universidade de São Paulo, São Paulo (1974): 81-97.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo, Edgard Blucher, 2ª edição, 1980.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999. 236 p.

CLERICI, A.; PEREGO, S.; TELLINI, C.; VESCOSI, P. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. **Geomorphology**, v. 48, n. 4, p. (2002). 349-364.

COE, J. A.; GODT, J.W.; BAUM, R. L.; BUCKNAM, R. C.; MICHAEL, J. A. **Landslide susceptibility from topography in Guatemala**. In: LACERDA, EHRICH, FONTOURA & SAYÃO (Eds) *Landslides: Evaluation and Stabilization*. Taylor & Francis Group, London. 2004, p. 69-78. Disponível em: http://landslides.usgs.gov/docs/coe/Coe_lsf.pdf. Acesso em: 26 de janeiro de 2012.

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia. In: **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. (orgs.) Antonio José Teixeira Guerra e Sandra Baptista da Cunha - 3ª ed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. 472p.

CORDANI, U. G., GIRARDI, V. A. V. Geologia da folha de Morretes. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, v. 26, p. 1-40. 1967.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Zoneamento Geoambiental da Região de Irapueta – CE**. Texto explicativo. Carta Geoambiental. Fortaleza: CPRM, 2003.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicado ao estudo de movimentos de massa no município de Caraguatatuba – SP. In: Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, 10. Foz do Iguaçu. **Anais**. INPE. 2001. p. 931-933. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2001/09.19.12.45/doc/0931.933.113.pdf>. Acesso em: 13 de janeiro de 2012.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; FILHO, P. H.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CRUZ O. **A Serra do Mar e o litoral na área de Caraguatatuba-SP**. Série teses e monografias, Instituto de Geografia – USP, 1974.

CUNICO, C. **Zoneamento Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Marumbi-PR: Perspectivas para a Análise e Avaliação das Condições Socioambientais**. 176 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geografia). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

CURCIO, G. R. **Caracterização e gênese de Podzólicos Vermelho-Amarelos e Cambissolos da porção sul da Serra do Mar – PR**. Curitiba, 1992. 166 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

DAI, F. C.; LEE, C. F.; NGAI, Y. Y. Landslide risk assessment and management: an overview. **Engineering Geology**, v. 64, n. 1, p. 65-87, Abr. 2002.

DALMAS, F. B. **Geoprocessamento aplicado à Gestão de Resíduos Sólidos na UGRHI-11 - Ribeira do Iguape e Litoral Sul**. Dissertação (Mestrado) Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo. 2008.

DELGADO M. G.; BARREDO CANO J. I. **Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio** (2ª Ed.) Alfaomega, México, 2005.

DIAS, F. P.; HERRMANN, M. L. P. Análise da suscetibilidade a deslizamentos no bairro Saco Grande, Florianópolis-SC. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, **Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra**, v. 21(1). 2002. p. 91-104. Disponível em: <http://www.editora.ufrrj.br/revistas/exatas/rce/v21n1/07.pdf> Acesso em: 07 de fevereiro de 2012.

DIAS, L. S. O. **Identificação de Áreas Suscetíveis e Deslizamento da Terra Utilizando Sistema de Informações Geográficas**. 75p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana). Universidade Federal da Bahia. (2006).

DREW. D. **Processos Interativos Homem-Meio Ambiente**. São Paulo, Difel, 1986.

DIGITALGLOBE. Imagem de satélite WordView-1. Banda pancromática. Resolução espacial de 0,50m no nadir e 0,59m a 25° off nadir. Data de imageamento em 05 de maio de 2011.

DYLIK, J. Notion du versant en geomorphologie. Bulletin de l' Academie Polonaise des Sciences. **Series des Sciences Geologiques et Geographiques**. 16;2, p. 125-132. 1968.

EASTMAN, J. R.; JIANG, H. Fuzzy Measures in Multi-criteria Evaluation. In: International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Studies, 2., Colorado, 1996. **Proceedings**. Colorado: USDA, 1996. p.527-534.

EASTMAN, J. R. **IDRISI for Windows: Introdução e Exercícios Tutoriais – Versão 2**. Tradução: Heinrich Hasenack e Eliseu Weber. Porto Alegre: UFRGS - Centro de Recursos IDRISI, 1998.

EASTMAN, J. R. Decision support: decision strategy analysis. IDRISI 32 release 2: **guide to GIS and image processing**, Worcester: Clark Labs, Clark University, 2001. V.2, 22p.

EASTMAN, J. R. **IDRISI Taiga Guide to GIS and Image Processing**; Manual Version 16.02; Clark Labs: Worcester, MA, USA, 2009.

ERCANOGLU, M.; GOKCEOGLU, C. **Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey)**. Engineering Geology, v. 75, p. 229-250, 2004.

ERMINI, L.; CATANI, F.; CASAGLI, N. Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment. **Geomorphology**, v. 66, p. 327-343, 2005.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico geomorfológica. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. da (UFRS) **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 3. Ed. Rio de Janeiro, 2000 p. 123-194.

FERNANDES, M. C.; LAGÜÉNS, J. V. M.; COELHO NETTO, A. L. O processo de ocupação por favelas e sua relação com os eventos de escorregamentos no maciço da Tijuca/RJ. **Anuário do Instituto de Geociências**, v.22, (1999) p. 45-59.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Condicionantes geomorfológicos dos escorregamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas suscetíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, (2001) p. 51-71.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 2. Ed. Curitiba: Ed. UFPR, 2009. 604p.

FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais** (org.). São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FRANCISCO, C. N. Mapeamento das áreas de riscos de deslizamentos e desmoronamentos do Parque Nacional da Tijuca (RJ) e entorno através de Sistemas Geográficos de Informação. 1ª Semana Estadual de Geoprocessamento. 1996, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro, Clube de Engenharia, 1996. P. 197-209. Disponível em: http://www.professores.uff.br/cristiane/Documentos/SEGEO_1996b.pdf. Acesso em: 03 de julho de 2012.

GIRÃO, O. **Análise de Processos Erosivos em Encostas na Zona Sudoeste da Cidade do Recife – Pernambuco**. 305p. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA S. B. Degradação Ambiental. *In*. **Geomorfologia e meio ambiente** / Antonio José Teixeira Guerra e Sandra Baptista da Cunha (Orgs.). 3 Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000. 372p.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. *In*: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. (Ed.) **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, Cap. 4, 1998, p. 179-209.

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. S. **Geomorfologia Ambiental**, Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006.

GUERRA A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. - 6ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008. 652p.

GUIDICINI, G.; IWASA, O. Y. **Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos em meio tropical úmido**. São Paulo: IPT, (1976), 48 p.

GUIDICINI, G., NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo. Edgard Blücher; Ed. da Universidade de São Paulo, 1984. 194p.

GUIMARÃES, I. M. D. P. S.; CANEPARO, S. C. Identificação de áreas adequadas à implantação de infra-estrutura arquitetônica através do uso do sistema de informação geográfica (SIG): estudo de caso–Parque Nacional Saint-Hilaire/Lange–Paraná. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, 14. Editora UFPR. 2007. p. 67-83.

GUZZETTI, F.; CARRARA, A; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and this application in a multi-scale study, central Italy. **Geomorphology**, 31: (1999) 181-216.

HASENACK H.; WEBER E. J.; VALDAMERI R. **Análise da Vulnerabilidade de um Parque Urbano Através de Módulos de Apoio a Decisão em Sistemas de Informações Geográficas**. IV Congresso e Feira de Usuários de Geoprocessamento UFRG, 1998. Disponível em www.clarklabs.org.br/ufrgs. Acesso em 18/02/2012.

IAPAR - INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Cartas climáticas básicas do Estado do Paraná**. Londrina: Instituto Agrônomo do Estado do Paraná, 1978. 41 p.

IAPAR - INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Cartas climáticas do estado do Paraná**. Londrina/PR, 2000.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira** (Série Manuais Técnicos em Geociências – Número 1). Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 1992. 92 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Vocabulário Básico de Recursos Naturais e Meio Ambiente**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2004. 332p.

IPARDES – INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Macrozoneamento da APA de Guaraqueçaba**. Curitiba: Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social, 1990. 257 p.

IPARDES – INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Diagnóstico Físico Ambiental da Serra do Mar – Área Sul**. Curitiba: Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social, 1991. 107 p.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. **Ocupação de encostas**. Coord. Cunha, M. A. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991.

JIANG, H.; EASTMAN, J. R. Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, v.14, n.2, p. 173-184, 2000.

KOMAC, M. A. Landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. **Geomorphology**, v. 74, p. 17-28, 2006.

KOZCIAK, S. **Análise Determinística da estabilidade de Vertentes na Bacia do Rio Marumbi – Serrra do Mar – Paraná**. 141 p. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.

LEE, S; RYU, J. **Probabilistic landslide hazard mapping using GIS and Remote Sensing data at Boun, Korea**. In: LACERDA, EHRLICH, FONTOURA & SAYÃO (EDS) **Landslides: Evaluation an Stabilization**. Taylor & Francis Group, London, 2004. p. 91-95.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178p.

LIBAULT, A. **Os quatro níveis da pesquisa geográfica**. Métodos em Questão. (1). São Paulo: IGEO/USP, 1971.

LIMA, S. T.; SOUZA, J. B. O geoprocessamento aplicado na identificação de áreas com suscetibilidade a movimento de massas no Parque das Mangabeiras em Belo Horizonte – MG. **Revista eletrônica E-Scientia**. (2008). Disponível em:

<http://revistas2.unibh.br/index.php/dcbas/article/view/118>. Acesso em: 03 de julho de 2012.

LIOTTE, S. V. **Utilização de Técnicas de Geoprocessamento para apoio ao planejamento físico-territorial do município de Pariquera-Açu/SP**. 2000. Dissertação de Mestrado em Geociências - Universidade de São Paulo.

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. 2ª ed. Editora José Olympio. 1968. Rio de Janeiro. 450p.

MALCZEWSKI, J. **GIS and multicriteria decision analysis**. New York: John Wiley, 1999. 362p.

MALZEWSKI, J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. **Progress in Planning**, v. 62, n. 1, p. 3-65, 2004.

MANTOVANI, F.; SOETERS, R.; WESTEN, C. J. Remote sensing techniques for landslides studies and hazard zonation in Europe. **Geomorphology**, v. 15, n. 3-4, p. 213-225, 1996.

MARCELINO, E. V. **Mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamento no município de Caraguatatuba (SP) usando técnicas de sensoriamento remoto e SIG**. São José dos Campos. 228p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004.

MARTINI, L. C. P.; UBERTI, A. A. A.; SCHEIBE, L. F.; COMIN, J. J.; OLIVEIRA, M. A. T. Avaliação da suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa: decisão multicriterial suportada em sistemas de informações geográficas. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, v. 6, n. 1, p. 41-52, jul, 2006.

MEIRELLES, M. S. P. **Análise integrada do ambiente através de Geoprocessamento – uma proposta metodológica para elaboração de zoneamentos**. Tese (Doutorado em Geociências) Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

MEM – Ministry of Energy and Mines. Geological Survey Branch. **Landslide in British Columbia**. Victoria: MEN, 1997. (Information Circular IC1995-7).

MIARA, M. A.; OKA-FIORI, C. **Análise por múltiplos critérios para a definição de níveis de fragilidade ambiental—um estudo de caso: bacia hidrográfica do rio Cará-Cará, Ponta Grossa/PR**. R. RAE GA, n. 13, p. 85-98, 2007.

MINEROPAR (MINERAIS DO PARANÁ S/A). **Atlas Geológico do Estado do Paraná**. Curitiba 2001. Disponível em <<http://www.mineropar.gov.pr.br>>. Acesso em 10 de agosto de 2012.

MINEROPAR (MINERAIS DO PARANÁ S/A). **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná**. 2006. Disponível em <<http://www.mineropar.gov.pr.br>>. Acesso em 15 de outubro de 2012.

MINEROPAR (MINERAIS DO PARANÁ S/A). **Acidentes Geológicos Urbanos**. Curitiba, 2010. 1ª ed. 78p.

MINEROPAR (MINERAIS DO PARANÁ S/A). **Mapeamento Geológico Geotécnico da Porção Leste da Serra do Mar do Estado do Paraná**. MINEROPAR (Minérios do Paraná S/A), 2011. 91p.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 425 p., 2005.

MOREIRA, F. R. S. **Uso e Avaliação de Técnicas de Integração e Análise Espacial de Dados em Pesquisa Mineral Aplicadas ao Planalto de Poços de Caldas**. Dissertação (Mestrado) Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002.

MOREIRA, M. R. **Atlas multimídia sobre movimentos de massa na Serra do Mar Paulista – município de Cubatão/ SP**. 149 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2008.

MOURA, S. S.; SEVERO, R. N. F.; JÚNIOR, O. F. S.; NETO, O. F.; PEREIRA, A. C.; BORJA, E. V.; ARAÚJO, M. F. D.; SILVA A. E. **Mapeamento de risco simplificado de deslizamento de encostas no município de Tibau do Sul – RN**. In. I Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica. Natal-RN – 2006.

NUMMER, A. V. **Parâmetros Geológico-Geotécnicos controladores dos Movimentos de Massa na Rota do Sol/RS 486 - Itali, RS**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), PPGEC-UFRGS, Porto Alegre, 220 p., 2003.

OKA-FIORI; SANTOS, L.J.C.; CANALI, N. E.; FIORI, A.P.; SILVEIRA, C.T.; SILVA, J.M.F.; ROSS, J.L.S. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná**: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000. 59 p. Minerais do Paraná – MINEROPAR, Curitiba, 2006.

PALACIOS, J. D.; CHUQUISENGO, O.; FERRADAS, P. **Gestión de riesgo en los gobiernos locales**. Lima: Soluciones Prácticas –ITDG, 2005.

PALHARES, J. M. **Superfícies aplanadas do planalto de Guarapuava**. 168p. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, 2011. Disponível em: <http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/handle/1884/26845>. Acesso em: 31 de Outubro de 2014.

PARANÁ. Governo de Estado. Coordenadoria Estadual de Defesa Civil. **Boletim** das chuvas no Estado - atualizado 13 h, 24 mar. 2011. Disponível em: <<http://www.defesacivil.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=885>> Acesso em: 03 de novembro 2012.

PARISE, M. Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. **Physics and Chemistry of the earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science**, v. 26, n.9, (2001), p. 697-703.

PASSOS, E. Classificação fitogeomorfológica de ecossistemas florestais numa porção do setor oriental do Estado do Paraná. Tese (Doutorado em Manejo Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2000. 244p.

PENTEADO M. M. **Fundamentos de Geomorfologia**. Rio de Janeiro, IBGE, 1974. 158p.

PHI, N. Q.; BAC, B. H. Landslides hazard mapping using Bayesian approach in GIS – case study in Yangsan Area, Korea. **International Symposium on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences**. 2004. Disponível em: <http://vietpcu.net/gislab/Publications/GIS-IDEAS%202004.pdf>. Acesso em: 08 de março de 2012.

PRADHAN, B.; SINGH, R.P.; BUCHROITHNER, M.F. Estimation of stress and its use in evaluation of landslide prone regions using remote sensing data. **Advances in Space Research**, v. 37, p. 698-709, 2006.

RAMOS R. A. R.; MENDES, J. F. G. Avaliação da aptidão do solo para localização industrial: O caso de Valença. **Revista de Engenharia Civil**, n. 10, p.7-29, 2001. Universidade do Minho, Minho, Portugal.

RAMOS, C. S.; SANCHEZ, M. C. Estudo metodológico de classificação de dados para cartografia temática. **Geografia**, v. 25, n. 2, p. 23-52, 2000.

REBELO, F. **Geografia Física e Riscos Naturais**. Imprensa da Universidade de Coimbra, 2010 p. 215.

REFOSCO, J. C. Modelos dinâmicos espaciais e sua utilização na análise de mudanças do uso do solo regional. In: ALMEIDA, C. M; CÂMARA G; MONTEIRO A. M. V. (Orgs) **Geoinformação em urbanismo: cidade real X cidade virtual**. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2007 p. 328-368.

REIMER, É. da S. **Inventário dos movimentos de massa e análise da suscetibilidade aos escorregamentos rasos em solo no distrito de Cascatinha, Petrópolis, RJ**. Anu. Inst. Geocienc., Rio de Janeiro, v. 29, n. 2, 2006. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-97592006000200068&lng=es&nrm=iso>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2012.

REIS, F. A. G. V. **Curso de Geologia Ambiental utilizando técnicas de educação a distância via internet**. 125p. Dissertação (Mestrado – Geociências e Meio Ambiente). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho (Unesp). Rio Claro. 2001. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/>. Acesso em: 27/06/2014.

RODERJAN, C. V. **O gradiente da Floresta Ombrófila Densa no Morro do Anhangava, Quatro Barras, PR – Aspectos climáticos, pedológicos e fitossociológicos**. Tese (Doutorado) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1994. 119p.

RODERJAN, C. V.; KUNIYOSHI, Y. S. **Macrozoneamento Florístico da Área de Proteção Ambiental APA - Guaraqueçaba**. FUPEF Série Técnica. 15, n. 1, p. 1-53. 1988.

ROCHA, G. C. **Riscos ambientais: análise e mapeamento em Minas Gerais**. Geraldo César Rocha. – Juiz de Fora: Ed. EFJF, 2005. 126p.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia Ambiente e Planejamento**. 2ª ed. São Paulo: Contexto, 1991.

ROSS, J. L. S. **Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. Revista do Departamento de Geografia**, n. 8, São Paulo: FFLCH/USP, 1994.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia Aplicada aos Eias-Rimas**. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da (org). **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 3 ed. p. 291 – 336, 1996.

RUHOFF, A. L.; SOUZA, B. S. P.; GIOTTO, E.; PEREIRA, R. S. **Lógica Fuzzy e Zoneamento ambiental da Bacia do Arroio Grande**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2355-2362. CD-ROM, On-line. ISBN: 85-17-00018-8. Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.18>>. Acesso em: 04 de junho de 2012.

SAATY, T. L. **Analytical Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation**. McGraw-Hill, New York, NY, USA. 1980.

SALOMÃO, F. X. T. **Controle e prevenção dos processos erosivos**. In: Guerra, A. J. T.; Silva, A. S.; Botelho, R. G. M. (Ed.) **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. Cap. 7, p. 229-268.

SAMIZAVA, T. M.; KAIDA, R. H.; IMAI, N. H.; NUNES, J. O. R. **SIG aplicado à escolha de áreas potenciais para instalação de Aterros Sanitários no município de Presidente Prudente – SP - Revista Brasileira de Cartografia** Nº 60/01, Abril 2008. (ISSN 1808-0936). Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/co>>. Acesso em: 27 de setembro de 2012.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental conceitos e métodos/** Luiz Enrique Sanches. – São Paulo: Oficina de Textos, 2008 p.495.

SCHAEFER, C. E. CAIXETA, P. R. C; PIMENTA, D. F. N.; DO AMARAL, R. V. Análise Multi-Critério (MCE) aplicada ao mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa na área urbana de Viçosa-MG. **IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação** Recife - PE, 06- 09 de Maio de 2012. p. 001 – 009. Disponível em: http://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIV/CD/artigos/SIG/131_5.pdf. Acesso em: 10 de Novembro de 2012.

SEMA - Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Paraná. **Alturas Pluviométricas diárias (mm) – ano 2011**. Contato pessoal em maio de 2012.

SESTINI, M. F. **Variáveis geomorfológicas no estudo de deslizamentos em Caraguatatuba – SP utilizando imagens TM-LANDSAT e SIG**. 140 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / INPE. São José dos Campos, 2000.

SIDLE, R. C., PEARCE, A. J., O' LOUGHLIN, C. L. **Hillslope stability and Land Use**. **American Geoph.** Union, Washington D.C., 140 p. 1985.

SIEDLECKI, K. N.; PORTES, M. C. de O.; CIELO FILHO, R. **Proposta de Adequação dos Limites do Parque Nacional Saint-Hilaire/Lange (Serra da Prata) – Estado do Paraná**. Artigo apresentado no 2º Simpósio de Áreas Protegidas – Conservação no Âmbito do Cone Sul, Curitiba, 2003a.

SILVA, A. B. **Sistemas de Informações Georreferenciadas: Conceitos e Fundamentos/** Ardemiro de Barros Silva – Campinas, SP: Editora da Unicamp, 236 p. 2003.

SILVA, M. A. **Aplicação de lógica nebulosa para previsão do risco de escorregamentos de taludes em solo residual**. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) UFRJ, Rio de Janeiro (2008).

SILVA, M. M.; SOUZA, C. J. S.; COSTA, K. S. P. Modelagem morfométrica e imagens QuichBird aplicadas a suscetibilidade a deslizamentos de encostas no bairro Coroadinho – São Luís, MA. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.0949. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.27.18.51/doc/p0656.pdf>. Acesso em: 23 de maio de 2012.

SILVEIRA, C. T. **Estudo das unidades ecodinâmicas da paisagem na APA de Guaratuba/PR**: Subsídios para o planejamento ambiental. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

SILVEIRA, C. T., FIORI, A. P., FERREIRA, A. M., de GÓIS, J. R., De MIO, G., SILVEIRA, R. M. P., LEONARDI, T. M. H. Emprego de atributos topográficos no mapeamento da susceptibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacareí, Paraná. **Revista Sociedade & Natureza**, 25(3). (2013). Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/view/21016> Acesso em 13 de janeiro de 2014.

SILVEIRA, C. T., FIORI, A. P., FERREIRA, A. M., FELIPE, R. D. S., KEPEL FILHO, J. L., FOLADOR, R. M., COSTA, L. C. Análise do fator de segurança da estabilidade das vertentes na bacia do Rio Jacareí, Serra do Mar paranaense. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 13(3). (2013). Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/224>. Acesso em 25 de janeiro de 2014.

SOARES, P. C.; SOARES, A. N.; FIORI, A. F. **Raciocínio probabilístico aplicado à suscetibilidade de escorregamentos: um estudo de caso em Campo Largo, Paraná, Brasil**. Editora UFPR, Boletim Paranaense de Geociências, 2002. N. 51 p. 59-76. Disponível em: <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/geociencias/article/view/4171>. Acesso em: 07 de junho de 2012.

SOUZA, L. C de P.; SIRTOLI, A. E.; LIMA, M. R.; DONHA, A. G. Estudo do Meio Físico na Avaliação de Bacias Hidrográficas Utilizadas como Mananciais de Abastecimento. In: ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C. **Gestão Integrada de Mananciais de Abastecimento Eutrofizados**. Curitiba: SANEPAR – Finep, 2005. 500 p. 123 – 158.

SOUZA, F. T. **Predição de Escorregamentos das Encostas do Município do Rio de Janeiro através de Técnicas de Mineração de Dados**. Tese (Doutorado). Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004. Disponível em: [http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/BDS.nsf/7ff4db7574e364c803256ebc004add8c/037e354cbffe1b150325713100466c77/\\$FILE/SOUZA_FT_04_t_D_int.pdf](http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/BDS.nsf/7ff4db7574e364c803256ebc004add8c/037e354cbffe1b150325713100466c77/$FILE/SOUZA_FT_04_t_D_int.pdf). Acesso em 21 de novembro de 2012.

STRUMINSKI, E. **Parque Estadual Pico do Marumbi**. Curitiba: Editora UFPR, 2001. 185p.

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar**. São Paulo, Edgard Blücher. 2003. 400p.

SUGUIO, K.; BIGARELLA, J. J. **Ambientes Fluviais**. Florianópolis: Editora da UFSC: Editora da Universidade Federal do Paraná, 1990. 2. Ed. 183p.

TARDIVO, R. N. **Evaluación Multicriterio, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección Aplicado a La Ordenación Territorial**. Asignación de usos del suelo en la cuenca inferior del Rio Salado. Provincia de Santa Fé – República Argentina. UNIGIS España, Universidade de Girona, 2001, p. 71.

TEMESGEN, B.; MOHAMMED, M. U.; KORME, T. Natural hazard assessment using GIS and remote sensing methods, with particular reference to the landslides in the Wondogenet Area, Ethiopia. **Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science**, v. 26, n. 9, p. 665-675, Set. 2001.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro, FIBGE/SUPREN, 1977. 97p.

TORO, J., PEDROSO, F. F., RAMIREZ, F., LINERO, C., RUBIANO, D., DOURADO, F., SOUZA, L. **Apostila de apresentações de movimentos gravitacionais de massa**. Programa de capacitação em gestão de riscos de desastres. The Work Bank. 2013. 146p. Disponível em: http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/publicacoes/Apostila_GRD_Mov_Gravitacionais_Massa_Banco_Mundial.pdf. Acesso em 13 de novembro de 2013.

VALENTE, R. O. A. **Definição de áreas prioritárias para conservação e preservação florestal por meio da abordagem multicriterial em ambiente SIG**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade de São Paulo – USP, São Paulo/SP, 2005.

VALENTE, R. D. O. A., VETTORAZZI, C. A. Comparação entre métodos de avaliação multicriterial, em ambiente SIG, para a conservação e a preservação florestal. **Scientia Forestalis**, 69, 51-61. (2005).

VALERIANO, M. M. **TOPODATA: Guia de utilização de dados geomorfométricos locais**. São José dos Campos: INPE, 2008. 44p.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F.; ALBUQUERQUE, P. C. G. Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal, RN. Anais..., São José dos Campos, SP : INPE, 2009. v. CD-ROM. p. 1-8.

VANACÔR, R. N. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao mapeamento das áreas suscetíveis a movimentos de massa na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/8344> Acesso em: 07 de março de 2012.

VANHONI, F.; MENDONÇA, F. O clima do litoral do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3/4, p. 49 - 63, 2008.

VARANDA, É. **Mapeamento quantitativo de risco de escorregamentos para o 1º Distrito de Petrópolis/RJ utilizando Sistema de Informações Geográficas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro (2006). Disponível em: http://www.ebookcult.com.br/produto/free_download/id_produto=109127 Acesso em: 25 de fevereiro de 2012.

VARNES, D. J. Slope movements: **types and processes - landslides analysis and control**. Washington: National Academy of Sciences, p. 11-13. 1978.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. & LIMA, J. C. **Classificação da Vegetação Brasileira adaptada a um Sistema Universal**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística / Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991. 123 p.

VETTORAZZI, C. A. **Avaliação Multicritérios, em Ambiente SIG, na Definição de Áreas Prioritárias à Restauração Florestal Visando à Conservação de recursos Hídricos**. Tese (Doutorado em Engenharia Rural), Universidade de São Paulo – USP, São Paulo/SP, 2006.

VIEIRA, B. C. **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas**. 193p. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: http://www.ppgg.igeo.ufrj.br/index.php?option=com_content&task=view&id=431&Itemid=49 Acesso em; 15 de dezembro de 2012.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGRAW-Hill do Brasil, 1975. 245p.

WEBER, E. J.; HASENACK, H. **Avaliação de áreas para a instalação de aterro sanitário através de análises em SIG com classificação contínua dos dados**. Universidade Luterana do Brasil, Canoas – RS, 2001.

WESTEN, C. J.; RENGERS, N.; TERLIEN, M. T. J.; SOETERS, R. Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS - based hazard zonation. **Geologische Rundschau**, v. 86, n.2, p. 404-414, Set.. (1997).

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. Escorregamentos em encostas na Serra do Mar – Brasil. **Solos e Rochas**, v. 12, n. único, (1989), p. 27-36.

WREGE, M. S.; STEINMETZ, S.; JUNIOR, C. R.; ALMEIDA, I. R. **Atlas Climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2011.

XAVIER-DA-SILVA, J. **Geoprocessamento para análise ambiental**. 2ª ed. Rio de Janeiro: J. Xavier da Silva, 2001. 228p.

YAGER, R. R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 18, n.1, p. 183-190, 1988.

ZAIDAN, R. T. **Risco de escorregamento numa bacia de drenagem urbana no município de Juiz de Fora – MG**. 99 p. Tese (Doutorado em Geografia). Rio de Janeiro: UFRJ/PPGG, 2006. Disponível em: http://www.ppgg.igeo.ufrj.br/index.php?option=com_content&task=view&id=476&Itemid=49 Acesso em: 20 de fevereiro de 2012.

ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. F. M.; SILVA, A. N. R. & NEGRI, J. C. **Análise de decisão multicritério na localização de usinas termoeletricas utilizando SIG.** Pesquisa Operacional, Rio de Janeiro, v.25, n.2, p.183-199, 2005.

ZÊZERE, J. L.; GARCIA, R. A. C. Avaliação de Riscos Geomorfológicos: Conceitos, Terminologia e Métodos de Análise. **III Seminário Recursos Geológicos, Ambiente e Ordenamento do Território**, p. 299-308, 2003. Disponível em: http://apgeo.pt/files/docs/CD_X_Coloquio_Iberico_Geografia/pdfs/075.pdf Acesso em: 17 de agosto de 2013.

ZÊZERE, J. L.; RODRIGUES, M. L.; REIS, E.; GARCIA, R.; OLIVEIRA, S.; VIEIRA, G.; FERREIRA, A. B. **Spatial and temporal data management for the probabilistic landslide hazard assessment considering landslide typology.** In: LACERDA, W. A.; EHRLICH, M.; FONTOURA, S. A. B.; SAYÃO, A. S. F. (Ed). *Landslides: evaluation & stabilization*. Londres: Taylor & Francis Group, 2004. p. 117-123.

ZÊZERE, J. L. **Dinâmica de vertentes e risco geomorfológico.** Centro de Estudos Geográficos, Relatório N.º41, Lisboa. 2005.

ZÊZERE, J. L. Predição Probabilística de Movimentos de Vertente na Escala Regional. **Actes de les Jornades sobre Terrasses i Prevenció de Riscos Naturals**, Department de Medi Ambient, Consell de Mallorca: 17-30. 2007.

ZÊZERE, J. L.; GARCIA, R. A. C.; DE OLIVEIRA, S. C.; REIS, E. **Análise sensitiva na avaliação da suscetibilidade a deslizamentos na região a norte de Lisboa.** Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa (2005).

ANEXOS

ANEXO 1 – TABELA COM CLASSIFICAÇÃO DE RESISTÊNCIA POR TIPOS DE ROCHAS MAIS COMUNS. VALORES ENTRE 1 (MAIS RESISTENTES) E 3 (MENOS RESISTENTES).

Tipos de Rochas	Pesos
Quartzitos ou Metaquartzitos	1,0
Riólito, Granito, Dacito	1,1
Granodiorito, Quartzo Diorito, Granulitos	1,2
Migmatitos, Gnaisses	1,3
Fonólito, Nefelina, Sienito, Traquito, Sienito	1,4
Andesito, Diorito, Basalto	1,5
Anortosito, Gabro, Peridotito	1,6
Milonito, Quartzo Muscovita, Biotita, Clorita Xisto	1,7
Piroxenito, Anfibolito, Kimberlito, Dunito	1,8
Hornblenda, Tremolita, Actinolita Xisto	1,9
Estaurolita Xisto, Xistos Granatíferos	2,0
Filito, Metassilito	2,1
Ardósia, Metargilito	2,2
Mármore	2,3
Arenitos Quartzosos ou Ortoquartzitos	2,4
Conglomerados, Subgrauvacas	2,5
Grauvacas, Ardózios	2,6
Siltitos, Argilitos	2,7
Folhelhos	2,8
Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos	2,9
Sedimentos Inconsolidados: Aluviões, Colúvios, etc.	3,0

FONTE: Crepani *et al.* (2001).

ANEXO 2 – TABELA COM VALORES DE VULNERABILIDADE PARA A AMPLITUDE ALTIMÉTRICA

Amplitude Altimétrica (m)	Vulnerabilidade	Amplitude Altimétrica (m)	Vulnerabilidade	Amplitude Altimétrica (m)	Vulnerabilidade
< 20	1,0	77 – 84,5	1,7	141,5 – 151	2,4
20 – 29,5	1,1	84,5 – 94	1,8	151 – 160,5	2,5
29,5 - 39	1,2	94 – 103,5	1,9	160,5 – 170	2,6
39 – 48,5	1,3	103,5 – 113	2,0	170 – 179,5	2,7
48,5 - 58	1,4	113 – 122,5	2,1	179,5 – 189	2,8
58 – 67,5	1,5	122,5 – 132	2,2	189 – 200	2,9
67,5 - 77	1,6	132 – 141,5	2,3	>200	3,0

FONTE: Crepani *et al.* (2001).

ANEXO 3 – TABELA COM GRAUS DE PROTEÇÃO DO SOLO POR DIFERENTES TIPOS DE COBERTURA VEGETAL.

Graus de Proteção	Tipos de Cobertura Vegetal
1- Muito Alta	Florestas/Matas naturais, florestas cultivadas com biodiversidade.
2- Alta	Formações arbustivas naturais com estrato herbáceo denso, formações arbustivas densas (mata secundária, cerrado denso, capoeira densa). Mata homogênea de Pinus densa. Pastagens cultivadas sem pisoteio do gado. Cultivo de ciclo longo como o cacau.
3- Média	Cultivo de ciclo longo em curvas de nível/terraceamento como café, laranja com forrageiras entre ruas, pastagens com baixo pisoteio, silvicultura de eucaliptos com sub-bosque de nativas.
4- Baixa	Culturas de ciclo longo de baixa densidade (café, pimenta-do-reino, laranja) com solo exposto entre ruas, culturas de ciclo curto (arroz, trigo, feijão, soja, milho, algodão) com cultivo em curvas de nível/terraceamento.
5- Muito Baixa a Nula	Áreas desmatadas e queimadas recentemente, solo exposto por arado / gradeação, solo exposto ao longo de caminhos e estradas, terraplenagens, culturas de ciclo curto sem práticas conservacionistas.

FONTE: Ross (1991, 1994, 2000).

ANEXO 4 – TABELA COM ESCALA DE EROSIVIDADE DA CHUVA E VALORES DE VULNERABILIDADE À PERDA DE SOLO.

Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade	Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade	Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade
< 50	1,0	200 - 225	1,7	375 - 400	2,4
50 – 75	1,1	225 - 250	1,8	400 - 425	2,5
75 – 100	1,2	250 - 275	1,9	425 - 450	2,6
100 – 125	1,3	275 - 300	2,0	450 - 475	2,7
125 – 150	1,4	300 - 325	2,1	475 - 500	2,8
150 – 175	1,5	325 - 350	2,2	500 - 525	2,9
175 – 200	1,6	350 - 375	2,3	> 525	3,0

FONTE: Crepani *et al.* (2001).